

DOI: 10.13652/j.spjx.1003.5788.2023.60144

# 小分子乳化剂在冰淇淋应用机制中的研究进展

陈 羚<sup>1</sup> 李丽君<sup>1</sup> 徐海军<sup>2</sup> 金华进<sup>3,4</sup> 钟 芳<sup>1</sup>  
夏熠珣<sup>1</sup> 康景然<sup>3,4</sup> 邬 娟<sup>3,4</sup> 王彩云<sup>3,5</sup>

(1. 江南大学食品学院, 江苏 无锡 214000; 2. 内蒙古伊利实业集团股份有限公司, 内蒙古 呼和浩特 010110;  
3. 内蒙古乳业技术研究院有限责任公司, 内蒙古 呼和浩特 010110; 4. 伊利伊诺科技(上海)有限责任公司,  
上海 200245; 5. 国家乳业技术创新中心, 内蒙古 呼和浩特 010110)

**摘要:**冰淇淋这种复杂的搅拌充气胶体系统在制作过程中,需要适度调节脂肪球的失稳以形成特定的结构。小分子乳化剂能够调控脂肪失稳程度,通过吸附在脂肪球表面、减少表面张力,以及与蛋白质争夺油水界面位置发挥作用。同时,小分子乳化剂可以推动脂肪颗粒的分散,或者在油水界面形成保护膜,从而影响脂肪结晶。另外,小分子乳化剂还能作为模板分子,引导脂肪形成各种特定形状,如球形、棒状和片状,并对脂肪晶体的大小和形态进行调节。这一过程会影响到脂肪球的失稳程度,进而改变冰淇淋的质地以及稳定性。文章主要从小分子乳化剂的构造和种类出发,探讨其与脂肪、蛋白质之间的互动关系及在冰淇淋中的作用原理,并分析小分子乳化剂对冰淇淋质地的影响。

**关键词:**小分子乳化剂;冰淇淋;质构;应用机制

## Advances in research on application mechanisms of small-molecule emulsifiers in ice cream

CHEN Ling<sup>1</sup> LI Lijun<sup>1</sup> XU Haijun<sup>2</sup> JIN Huajin<sup>3,4</sup> ZHONG Fang<sup>1</sup>  
XIA Yixun<sup>1</sup> KANG Jingran<sup>3,4</sup> WU Juan<sup>3,4</sup> WANG Caiyun<sup>3,5</sup>

(1. School of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214000, China; 2. Inner Mongolia Yili Industrial Group Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 010110, China; 3. Inner Mongolia Dairy Technology Research Institute Co., Ltd., Hohhot, Inner Mongolia 010110, China; 4. Yili Yinuo Technology (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 200245, China; 5. National Center of Technology Innovation for Dairy, Hohhot, Inner Mongolia 010110, China)

**Abstract:** Ice cream, a complex whipped and aerated colloidal system, requires an appropriate degree of fat globule destabilization during its production to form a specific structure. Small-molecule emulsifiers can regulate the degree of fat destabilization by adsorbing onto the fat globule surface, reducing surface tension, and competing with proteins for positions at the oil-water interface. At the same time, they can promote the dispersion of fat particles or form a protective film at the oil-water interface, thereby influencing fat crystallization. Moreover, small-molecule emulsifiers can act as template molecules, guiding the assembly of fats into various specific shapes, such as spherical, rod-like, and lamellar forms, and adjusting the size and morphology of fat crystals. This process affects the degree of fat globule destabilization, which in turn alters the texture and stability of ice cream. The structure and types of small-molecule emulsifiers were mainly explored, and their interactions with fats and proteins were explored, as well as their mechanism of action in ice cream. In addition, the impact of small-molecule emulsifiers on ice cream texture was analyzed.

**Keywords:** small-molecule emulsifier; ice cream; texture; application mechanism

### 1 冰淇淋中乳化剂的功能

冰淇淋空间结构的形成主要依赖于蛋白质、脂肪和

乳化剂。乳化剂能降低油水界面张力,在与蛋白质的共

同作用下,用来乳化脂肪。尽管乳化剂本身具有良好的

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(编号:32302282,32001628);江南大学自主科研计划重点项目(编号:JUSRP52029A)

通信作者:钟芳(1972—),女,江南大学教授,博士。E-mail: fzhong@jiangnan.edu.cn

王彩云(1979—),女,内蒙古乳业技术研究院有限责任公司高级工程师,硕士。E-mail: wangcaiyun@yili.com

收稿日期:2023-08-20 改回日期:2024-12-27

乳化效果,但在冰淇淋中它还扮演去乳化的角色<sup>[1]</sup>。冰淇淋的制作过程,主要包括溶解基料、均质、巴氏杀菌、老化浆料、冷凝搅打和硬化冰淇淋。乳化剂在各个工艺阶段中都发挥着不可替代的作用。加入乳化剂后经均质处理,脂肪球的粒径可分布在 1 μm 附近,显著增加了脂滴表面积;在老化过程中,乳化剂取代了脂肪球表面的蛋白质,降低了脂肪球的界面膜强度;在冷凝搅拌过程中,乳化剂通过影响脂肪结晶行为,诱导形成刚性结构的脂肪网络,进而改变了冰淇淋的硬度、质地和流变学特性<sup>[2-5]</sup>。

图 1 展示了加入小分子乳化剂后冰淇淋的模拟结构。在冰淇淋结构中,脂肪球和部分聚集的脂肪簇围绕气泡排列,稳定气泡,并与冰晶一起构建冰淇淋的空间结构,形成具有特定质构的冰淇淋。小分子乳化剂在体系中表现出优良的溶解性、扩散和乳化能力,且对系统黏度的影响较小,成本和用量较低,因此在食品领域应用广泛。常用的小分子乳化剂包括单双甘酯、丙二醇酯、乳酸酯和聚山梨醇酯等。不同类型的乳化剂在改善冰淇淋质构方面存在差异,例如:单双甘酯在提高冰淇淋抗融和抗收缩性能方面表现优异;丙二醇酯在抑制冰晶生长方面表现出色;乳酸酯在搅打性能方面表现优异,常用于提高冰淇淋的膨胀率<sup>[6]</sup>。实际应用中,可根据冰淇淋所需的脂肪失稳程度、硬度、抗热振性能和抗融化性能来挑选合适的乳化剂。

## 2 小分子乳化剂的结构及应用特性

小分子乳化剂(LMWE)指的是相对分子质量为 500~2 000 的乳化剂。这类乳化剂具有亲水性的头部和疏水性的尾部,可根据其基本性质分为非离子、阳离子、阴离子

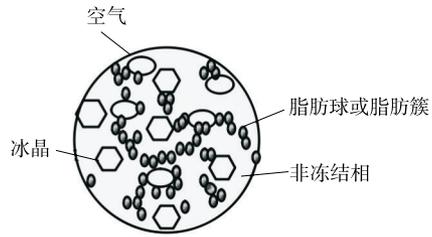


图 1 冰淇淋的模拟结构

Figure 1 Simulated structure of ice cream

和两性离子。其中非离子型在食品工业中较为常用,其结构包含亲脂性部分(含有饱和/不饱和脂肪酸或脂肪醇)和亲水性部分(含有聚氧乙烯、聚氧丙烯或多元醇)。这类乳化剂的性能通常受到烃链长度和饱和度的影响<sup>[7]</sup>。链长越短,乳化剂在乳液中的迁移速度越快,乳化性能越好。不饱和度越高,降低界面张力的能力越强,乳化性越好。下文主要介绍非离子型乳化剂中常用的单双甘酯、丙二醇酯、吐温 80 和蔗糖酯的结构及应用特性。

### 2.1 单双甘酯

单双甘酯是一种非离子型小分子表面活性剂,主要包含单酯和双酯成分,同时含有少量三酯<sup>[8]</sup>。由于其产量高且价格低,单双甘酯在食品乳化剂领域具有广泛的应用。图 2 分别展示了单、双和三甘酯的结构组成。单双甘酯的乳化性能主要取决于单甘酯的纯度、亲脂链长度以及脂肪酸基团中的双键数量。通常情况下,单甘酯含量越高,乳化性能和分散性就越好,相较之下,双甘酯乳化的脂肪滴往往具有较大的尺寸。

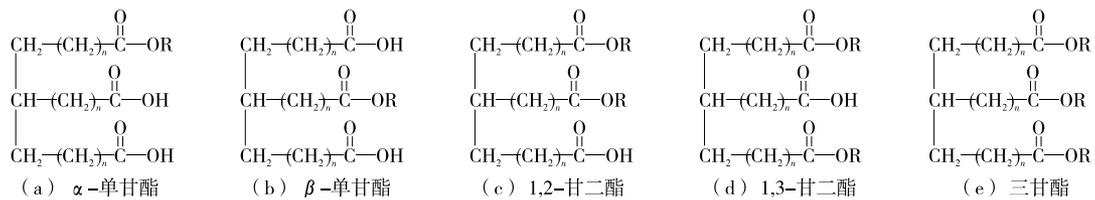


图 2 单、双、三甘酯的结构式

Figure 2 Structural formulas for monoglyceride, diacylglycerol and triglyceride

单双甘酯的熔点、界面活性和结晶形态主要受到脂肪酸组成(链长和不饱和度)的影响。长链饱和甘油酯能够提高乳液中脂肪的熔点,高浓度时可诱导成核,从而影响脂肪界面结晶。相较之下,不饱和单甘酯在油水界面上呈液体状,降低了界面膜的稳定性。当添加不饱和单甘酯时,形成的脂肪晶体向膜外突出,可能刺破界面膜,从而促进脂肪失稳<sup>[9]</sup>。

### 2.2 丙二醇酯

如图 3 所示,脂肪酸丙二醇酯通常在 1 位上与脂肪酸相连。此外,丙二醇酯也可以在 2 位上与脂肪酸链连接。丙二醇酯的 HLB 值约为 3,是一种典型的油包水乳化剂<sup>[10]3</sup>。丙二醇酯通过—OH 基团的水化作用,形成 α-结晶凝胶,具有良

好的保水性能。当温度升高时,丙二醇可以形成凝胶吸收水,而当温度降低时,水分子将重新沉积到冰晶上。因此,在冰淇淋中加入丙二醇酯可以缓解温度波动引起的冰晶尺寸增加,从而改善冰淇淋的热收缩。研究<sup>[11]</sup>发现,丙二醇酯(0.3 g/100 g 冰淇淋)能显著降低热振前后冷冻冰淇淋和蔗糖溶液中的冰晶大小,但在静态冷冻的溶液中无明显影响。在没有剪切作用的情况下,丙二醇酯不易结合在冰晶的特定平面上,无法形成足够的表面覆盖,从而失去再结晶抑制活性。丙二醇酯的乳化性能有限,难以在界面上取代蛋白质或减小脂肪球尺寸分布。在促进脂肪部分聚结效果方面,丙二醇酯远不及单/双甘油酯和聚山梨醇酯有效。因此,作为食品乳化剂,丙二醇酯通常与其他类型的乳化剂复配使用。



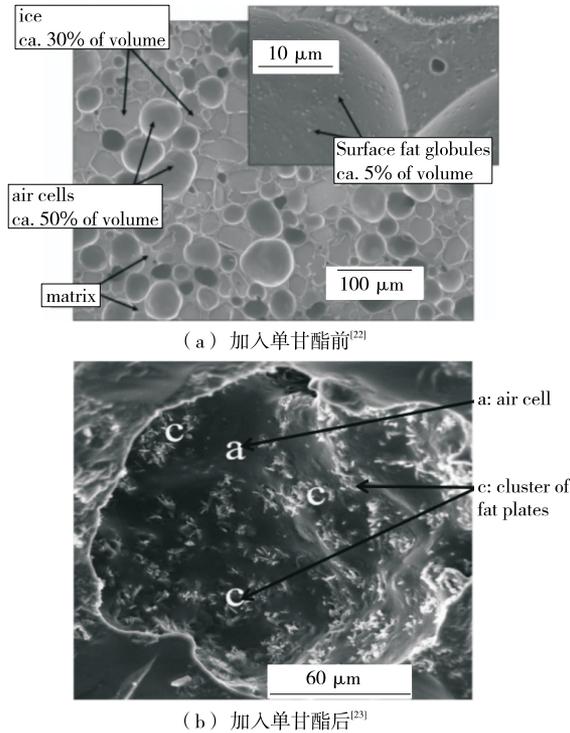


图 7 冰淇淋的冷冻扫描电镜照片

Figure 7 Cryo-scanning electron microscopy image of ice cream

### 3.1 对吸附蛋白的影响

在老化和冷凝搅打步骤中,水油界面的蛋白质会与小分子乳化剂发生相互作用,通过疏水和氢键相互作用等方式改变蛋白质结构的强度,或通过动态稳定机制影响蛋白质的分布,进而降低脂肪球界面膜的厚度,改变脂肪球的分布状态。通过测定界面张力、界面蛋白吸附量和界面黏弹性,可以评估小分子乳化剂与界面蛋白竞争吸附的强弱<sup>[24-25]</sup>。通过原子力显微镜、共聚焦显微镜和荧光光谱等方法可以研究界面上的蛋白质和乳化剂之间的相互作用<sup>[26]</sup>。

油溶性表面活性剂在取代蛋白质分子方面不如水溶性表面活性剂有效。具有亲水性的蔗糖酯倾向于修补界面蛋白网络之间的小孔或缺陷,能有效取代酪蛋白<sup>[27]</sup>,卵磷脂和硬脂酰乳酸钠则是通过静电或疏水相互作用在界面上与酪氨酸形成复合物,有效地取代蛋白。

对于甘油酯而言,不饱和单甘酯与饱和单甘酯对界面吸附蛋白的影响机制不同。硬脂酸单甘酯(饱和单甘酯)与蛋白质发生竞争吸附,取代蛋白质吸附在油水界面,使得脂肪球的界面膜变薄。也有研究<sup>[28]</sup>认为,饱和长链脂肪酸甘油酯能够在油水界面形成二维(2D)晶体,这种晶体具有很强的表面活性,能引起蛋白质的解吸,在很大程度上促进脂肪的失稳。油酸单甘酯(不饱和单甘酯)取代蛋白的能力较弱,可能是由于其吸附在界面时受到空间位阻影响,无法完全覆盖蛋白,从而导致蛋白膜被压

缩,但界面上吸附的蛋白质数量并未因此减少。最终,当蛋白质无法承受表面压力时,蛋白质分子才会释放进入乳清相<sup>[29]</sup>。尽管只涉及两种脂肪酸甘油酯,但显著的数据差异表明饱和脂肪酸甘油酯和不饱和脂肪酸甘油酯与界面吸附蛋白之间的相互作用存在差异。然而,也有研究<sup>[10]26</sup>表明,当不饱和脂肪酸甘油酯浓度增大时,界面蛋白的吸附量也会明显降低。

### 3.2 对晶核形成的影响

乳化剂作为表面活性物质,会吸附在脂肪球表面,从而改变脂肪的结晶特性和晶体生长特性。脂肪结晶经历 4 个典型的阶段,即晶核形成、晶体快速积累、结晶速度减缓和达到最大固体脂肪含量。成核是脂肪结晶的第一个过程,可分为初级成核(均相成核和非均相成核)和次级成核。冰淇淋生产过程中主要以初级成核为主。在乳化油脂中,脂肪被分散成许多小脂肪球。在特定脂肪球中找到杂质的概率很小,因此乳化油脂主要采用均相成核机制。在 4 °C 环境下,浆料中熔点较高的小分子乳化剂和脂肪在冷却时最先结晶。小分子乳化剂和脂肪通过异相成核加快成核速率,乳化剂还能影响脂肪成核的时间、温度及数量等。研究发现,单甘酯对晶核形成具有较大的影响。硬脂酸单甘酯、棕榈酸单甘酯、月桂酸单甘酯及其混合物能减少多种植物脂肪成核的诱导时间,加快结晶,减小晶体尺寸等<sup>[30]</sup>;单甘酯可通过模板缺陷,促进棕榈油非等温结晶更早开始,促进晶核形成<sup>[31]</sup>。

其中,长链饱和脂肪酸单甘酯能显著促进晶核形成,且产生的晶核数量多、尺寸小<sup>[32]</sup>。相较于饱和单甘酯,不饱和脂肪酸单甘酯对晶核形成的影响相对不明显<sup>[33]15</sup>。单硬脂酸甘油酯(饱和型乳化剂)结晶时,能在脂肪滴表面形成紧凑的覆盖层。而单油酸甘油酯(不饱和乳化剂)中含有双键,这阻止了碳氢尾部的相互靠近,导致形成的覆盖层相对松散<sup>[12]11</sup>。因此,不饱和单甘酯对晶体成核的影响较小,主要由饱和单甘酯促进成核。

### 3.3 对脂肪结晶生长的影响

晶核形成后,晶体开始慢慢生长。结晶的固体脂肪能够为脂肪网络结构的形成提供刚性支撑,而一定量的液态油具有润湿加固作用。适度的脂肪结晶能够促进脂肪球间的失稳,形成脂肪球网络结构,从而影响冰淇淋产品的硬度、质地、流变学等特性<sup>[33]14</sup>。脂肪结晶过程中涉及晶型转变和结晶速率变化。小分子乳化剂的亲水性和所连脂肪酸的组成会影响脂肪的晶型和结晶速率等。通过差示扫描量热仪(DSC)和核磁共振等方法可以测定脂肪结晶的熔化热、结晶脂肪含量,进而分析脂肪结晶的动力学,解析脂肪结晶行为。

亲脂性乳化剂单双甘酯能加速体系中的脂肪结晶,而亲水性乳化剂蔗糖酯和吐温 20 会减缓乳液体系中脂肪晶体穿越界面膜的速率,导致较大的脂肪结晶形成<sup>[34]</sup>。Foubert 等<sup>[35]</sup>研究发现,单双甘酯对乳脂结晶的影响取决

于甘油酯中的酰基以及它们在液体油中的溶解度。单油酸甘油酯可通过降低脂肪晶体生长速率、增加晶体生长维数、脂肪球表面突起长度来提高脂肪的聚集程度。单硬脂酸甘油酯结晶呈圆形,且平行于界面呈2D晶体,不易刺破界面膜<sup>[29, 36]</sup>。不同链长的饱和单酰基甘油(C<sub>12</sub>、C<sub>16</sub>、C<sub>18</sub>、C<sub>22</sub>)均能促进大豆油和棕榈油的结晶,但链长影响了单酰基甘油的结晶速率。Basso等<sup>[37]</sup>报道,具有较长酰基链的单酰基甘油在诱导和加速结晶过程方面优于棕榈油单甘酯。

根据自由能降低的趋势,脂质的同质多晶转变顺序为 $\alpha$ 型 $>$  $\beta'$ 型 $>$  $\beta$ 型。小分子乳化剂可以与油脂相互作用,调节油脂晶型,加快脂质晶体从 $\alpha$ 型向 $\beta'$ 型转变,同时使冰淇淋中的脂质晶体主要呈 $\beta'$ 型而非向 $\beta$ 型转变<sup>[38]</sup>。 $\alpha$ 型甘油酯不稳定但具有较好的分散性, $\alpha$ 型会自发转变为 $\beta'$ 型, $\beta'$ 型脂肪晶体呈细微针状,可相互交联形成网状结构,束缚液体油脂<sup>[39]</sup>。添加乳化剂,如单甘油酯、二甘油酯和蔗糖酯,是改变脂肪结晶行为的有效方法。蔗糖酯对多种特定晶型具有稳定或减缓转化速率的作用,在部分氢化的葵花籽油中加入0.01~0.10 g/100 g冰淇淋的蔗糖酯可延缓 $\beta'$ 到 $\beta$ 型的转变<sup>[24]</sup>。饱和的单甘酯能促进 $\alpha$ 型的成核,而不饱和的单甘酯不能<sup>[40]</sup>。二甘油酯也能够延迟 $\beta'$ 到 $\beta$ 型的转变,其有效性取决于酰基链的位置,sn-1,2的形式比sn-1,3的异构体更有效。在乳脂中也观察到这种位置异构体差异,只有1,2异构体增加了成核活化自由能垒,从而延缓了结晶<sup>[41]</sup>。

## 4 结语

饱和单双甘酯通过高效取代界面蛋白,并在油水界面形成紧密的晶体覆盖层,显著促进脂肪成核和小晶体生成,从而增强脂肪网络的刚性支撑;而不饱和单双甘酯受限于分子结构对界面蛋白取代能力较弱,对成核和晶体生长的促进作用有限。此外,蔗糖酯和吐温类乳化剂表现出修补界面缺陷和延缓晶体生长的特点,这对于提升冰淇淋的抗融化和抗热振性能具有重要意义。

尽管现有研究取得了重要进展,但乳化剂的协同作用及其在多相体系中的长期稳定性仍需深入探讨,天然乳化剂的开发和高效利用也有待进一步探索。未来应加强基于分子模拟和试验结合的方法研究,以全面解析乳化剂的动态作用行为,并开发更符合可持续发展理念的绿色乳化剂产品。

## 参考文献

[1] SALEM M M, FATHI F, AWARD R. Production of functional ice cream[J]. *Deutsche Lebensmittel-Rundschau*, 2006, 102(7): 326-330.

[2] JIAMYANNGYUEN S, DELWICHE J F, HARPER W J. The impact of wood ice cream sticks' origin on the aroma of exposed ice cream mixes[J]. *Journal of Dairy Science*, 2002, 85(2):

355-359.

- [3] ZHANG M K, GAO C, YE B, et al. Effects of four disaccharides on nucleation and growth of ice crystals in concentrated glycerol aqueous solution[J]. *Cryobiology*, 2019, 86: 47-51.
- [4] LIU X Y, SALA G, SCHOLTEN E. Impact of soy protein dispersibility on the structural and sensory properties of fat-free ice cream[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 147: 109340.
- [5] HEI X, LIU Z, LI S S, et al. Freeze-thaw stability of Pickering emulsion stabilized by modified soy protein particles and its application in plant-based ice cream[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 257: 128183.
- [6] HOMAYOUNI A, JAVADI M, ANSAR F, et al. Advanced methods in ice cream analysis: a review[J]. *Food Analytical Methods*, 2018, 11(11): 3 224-3 234.
- [7] PELAN B M C, WATTS K M, CAMPBELL I J, et al. The stability of aerated milk protein emulsions in the presence of small molecule surfactants[J]. *Journal of Dairy Science*, 1997, 80(10): 2 631-2 638.
- [8] MUSTAFA A, NIIKURA F, PASTORE C, et al. Selective synthesis of alpha monoglycerides by a clean method: techno-economic and environmental assessment[J]. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 2022, 27: 100690.
- [9] VERECKEN J, MEEUSSEN W, FOUBERT I, et al. Comparing the crystallization and polymorphic behaviour of saturated and unsaturated monoglycerides[J]. *Food Research International*, 2009, 42(10): 1 415-1 425.
- [10] 王家宝. 含丙二醇酯的低脂蛋糕烘焙特性与品质改良研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019.
- WANG J B. Study on baking characteristics and quality improvement of low-fat cake containing propylene glycol esters[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019.
- [11] TENG Y, STEWART S G, HAI Y W, et al. Sucrose fatty acid esters: synthesis, emulsifying capacities, biological activities and structure-property profiles[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2021, 61(19): 3 297-3 317.
- [12] 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.
- CHENG J J. The destabilization mechanism of fat globules at low temperatures and its effects on texture development of ice cream[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2017.
- [13] MUSE M R, HARTEL R W. Ice cream structural elements that affect melting rate and hardness[J]. *Journal of Dairy Science*, 2004, 87(1): 1-10.
- [14] TUAL A, BOURLES E, BAREY P, et al. Effect of surfactant sucrose ester on physical properties of dairy whipped emulsions in relation to those of O/W interfacial layers[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2006, 295(2): 495-503.
- [15] LIN P M, LEEDER J G. Mechanism of emulsifier action in an ice cream system[J]. *Journal of Food Science*, 1974, 39(1): 108-111.
- [16] GRANGER C, BAREY P, COMBE N, et al. Influence of the

- fat characteristics on the physicochemical behavior of oil-in-water emulsions based on milk proteins-glycerol esters mixtures[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2003, 32(4): 353-563.
- [17] BOS M A, VAN VLIET T. Interfacial rheological properties of adsorbed protein layers and surfactants: a review[J]. *Advances in Colloid and Interface Science*, 2001, 91(3): 437-471.
- [18] ZHANG Z, GOFF H D. On fat destabilization and composition of the air interface in ice cream containing saturated and unsaturated monoglyceride[J]. *International Dairy Journal*, 2005, 15(5): 495-500.
- [19] 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.
- [20] GOFF H, LIBOFF M, JORDAN W K. The effects of polysorbate 80 on the fat emulsion in ice cream mix: evidence from transmission electron microscopy studies[J]. *Food Microstructure*, 1987, 6(2): 193-198.
- [21] DICKINSON E, GELIN J L. Influence of emulsifier on competitive adsorption of alpha-s-casin + beta-lactoglobulin in oil-in-water emulsions[J]. *Colloids and Surfaces*, 1992, 63(3/4): 329-335.
- [22] JAMES F C, ANDREW B R, ANDREW R C, et al. Designing multiscale structures for desired properties of ice cream[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2008, 47(17): 6362-6367.
- [23] MENDEZ V C, GOFF H D. Fat structures as affected by unsaturated or saturated monoglyceride and their effect to nice cream structure, texture and stability[J]. *International Dairy Journal*, 2012, 24(1): 33-39.
- [24] WARREN M M, HARTEL R W. Effects of emulsifier, overrun and dasher speed on ice cream microstructure and melting properties[J]. *Journal of Food Science*, 2018, 83(3): 639-647.
- [25] MARYAM B P, LIM L. A review of modern instrumental techniques for measurements of ice cream characteristics[J]. *Food Chemistry*, 2015, 188: 625-631.
- [26] WOODWARD N, GUNNING A P, WILDE P, et al. Probing the in situ competitive displacement of protein by nonionic surfactant using atomic force microscopy[J]. *Langmuir*, 2010, 26(15): 12560-12566.
- [27] 陈雪. 蔗糖脂肪酸酯的合成与性能[D]. 无锡: 江南大学, 2009: 6.  
CHEN X. Synthesis and characteristics of sucrose fatty acid ester[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2009: 6.
- [28] FREDRICK E, HEYMAN B, MOENS K, et al. Monoacylglycerols in dairy recombined cream II: the effect on partial coalescence and whipping properties[J]. *Food Research International*, 2013, 51(2): 936-945.
- [29] CHEN J J, DUDU O E, LI X D, et al. Effect of emulsifier-fat interactions and interfacial competitive adsorption of emulsifiers with proteins on fat crystallization and stability of whipped-frozen emulsions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 101: 105491.
- [30] RIBEIRO A, MASUCHI M H, MIYASAKI E, et al. Crystallization modifiers in lipid systems[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2015, 52(7): 3925-3946.
- [31] LIVEIRA D E, RIBEIRO A, KIECKBUSCH T G. Hard fats improve technological properties of palm oil for applications in fat-based products[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2015, 63(2): 1155-1162.
- [32] EDAVIES E, DICKINSON E, BEE R. Orthokinetic destabilization of emulsions by saturated and unsaturated monoglycerides[J]. *International Dairy Journal*, 2001, 11: 827-836.
- [33] 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.  
ZHAO Q Z. Change and mechanism of whipping properties and qualities of whipped cream[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2006.
- [34] 靖卫勤. 充气乳液的结晶行为对其稳定性及体外消化性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2019: 5.  
JING W Q. Effect of crystallization behavior on the stability and *in vitro* digestion of aerated emulsion[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019: 5.
- [35] FOUBERT I, VANROLLEGHEM P A, DEWETTINCK K. A differential scanning calorimetry method to determine the isothermal crystallization kinetics of cocoa butter[J]. *Thermochimica Acta*, 2003, 400(1): 131-142.
- [36] 周莉. 复合乳化稳定剂在冰淇淋中的应用研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2006: 16.  
ZHOU L. Study on the application of mixed emulsifier-stabilizers in ice cream[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006: 16.
- [37] BASSO R C, RIBEIRO A P B, MASUCHI M H, et al. Tripalmitin and monoacylglycerols as modifiers in the crystallisation of palm oil[J]. *Food Chemistry*, 2010, 122(4): 1185-1192.
- [38] 余权. 乳化剂对酪蛋白乳液稳定性影响的机理研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011: 7.  
YU Q. Effect of emulsifier on the stability of casein-stabilized emulsions[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2011: 7.
- [39] WILTON Z, FRIBERG S. Influence of temperature-induced phase transitions on fat emulsions[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 1971, 48(12): 771-774.
- [40] WANG S L, LEE J W, WANG Y, et al. Effect of purification methods on the physicochemical and thermodynamic properties and crystallization kinetics of medium-chain, medium-long-chain, and long-chain diacylglycerols[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(31): 8391-8403.
- [41] WRIGHT A J, MARANGON A G. Effect of DAG on milk fat TAG crystallization[J]. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2002, 79(4): 395-402.