填充剂对减糖冰淇淋质构特性的影响

高博洋[1,2]，夏熠珣[1,2]，钟 芳[*1,2]
（1. 江南大学 食品学院，江苏 无锡 214122；2. 嘉兴未来食品研究院，浙江 嘉兴 314015）

摘要：随着人们减糖意识的提高，减糖冰淇淋的开发也得到了极大关注。然而，由于蔗糖在冰淇淋体系中除了提供甜味，对冰淇淋的质构特性也起了非常重要的作用，这也是目前研发减糖冰淇淋面临的巨大挑战。为了研究不同填充剂对减糖冰淇淋质构特性的影响，分别采用质量分数为10%的蔗糖、糖醇（山梨糖醇、赤藓糖醇、麦芽糖醇、木糖醇）、可溶性膳食纤维（抗性糊精、聚葡萄糖）、可溶性糊精（麦芽糊精）作为填充剂制备冰淇淋样品，并对各冰淇淋样品的质构特性及关键理化特性进行了系统比较。结果表明，聚葡萄糖、麦芽糖醇和抗性糊精填充样品与蔗糖填充样品感官质构轮廓最为相近。赤藓糖醇和麦芽糊精填充样品硬度过高、可塑性低、铺展性差；而山梨糖醇和木糖醇填充样品硬度较低、泡沫感强。糖醇类填充样品在浆料黏度、粒径分布、摩擦学性质上比较接近蔗糖填充样品；麦芽糖醇填充样品的热力学特性与蔗糖填充样品相似；膳食纤维和糊精填充样品具有较低的摩擦系数，润滑性能更好。可见，在无糖或减糖冰淇淋的开发中，采用麦芽糖醇配合聚葡萄糖或抗性糊精作为填充剂，可达到和蔗糖填充剂所制产品相似的质构品质。

关键词：冰淇淋；代糖；填充剂；质构；感官评价
中图分类号：TS 273　**文章编号：**1673-1689(2023)03-0064-10　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2023.03.008

Effect of Different Bulking Agents on Texture Characteristics of Sugar-Reduced Ice Cream

GAO Boyang[1,2]，*XIA Yixun*[1,2]，*ZHONG Fang*[*1,2]
（1. School of Food Science and Technology，Jiangnan University，Wuxi 214122，China；2. Jiaxing Institute of Future Food，Jiaxing 314015，China）

Abstract： With the improvement of people's awareness of sugar reduction, the development of ice cream using sugar substitutes has gained enormous attention. However, sucrose not only provides sweetness, but also plays a critical role in the textural characteristics of ice cream, which is a great challenge for sugar-reduced ice cream. Hereby, the current research is to investigate the effect of various bulking agents on the textural properties of sugar-reduced ice cream, ice cream samples were prepared using sucrose, polyols (sorbitol, erythritol, maltitol, xylitol), soluble dietary fiber (resistant dextrin, polyglucose) and soluble dextrin (maltodextrin) as the bulking agents at a mass fraction of 10%. The sensory texture characteristics and the key physical and chemical properties of ice cream

收稿日期：2021-11-22
基金项目：国家自然科学青年基金项目(32001628)；江苏省自然科学青年基金项目(BK20200596)；未来食品科学中心基本科研项目(JUSRP52029A)。
*通信作者：钟 芳(1972—)，女，博士，教授，博士研究生导师，主要从事食品胶体与感知科学方面的研究。E-mail：fzhong@jiangnan.edu.cn

samples were systematically compared. Results showed that the sensory texture profile of ice cream using polydextrose, maltitol or resistant dextrin as the bulking agent was most similar to that of the sample using sucrose as the bulking agent. Comparatively, ice cream using erythritol or maltodextrin as the bulking agent showed high hardness, low plasticity and poor spreadability, while samples using sorbitol or xylitol as the bulking agent had low hardness and high foaminess. The properties of viscosity, particle size distribution and tribological behaviors of samples using polyols as the bulking agents were closer to those of the sample using sucrose as the bulking agent. Particularly, the thermodynamic property of ice creams using maltitol as the bulking agent was quite similar to that of the sample using sucrose as the bulking agent. Besides, samples using dietary fiber or dextrin as the bulking agent exhibited lower friction coefficient and better lubricating property. Accordingly, in the development of sugar-free or sugar-reduced ice cream, a similar texture profile with that of ice cream using sucrose as the bulking agent could be achieved using maltitol combined with polyglucose or resistant dextrin.

Keywords: ice cream, sugar substitution, bulking agents, texture, sensory evaluation

冰淇淋作为一种冷冻食品，在全世界范围内深受消费者的喜爱。中国饮食行业协会发布的调查数据显示，2019 年中国的冰淇淋市场规模已经跃居全球第一。充足的甜味、细腻丝滑的口感是驱动消费者购买冰淇淋的重要因素，为了保持独特的口感和风味，传统冰淇淋往往具有较高的蔗糖质量分数（10%~16%），然而，糖的过度摄入可能增加肥胖[1]和 2 型糖尿病等流行性疾病的发病率[2-5]，对人类健康构成严重威胁，随着人们的减糖意识日渐高涨，低糖或无糖冰淇淋亟待开发。然而，在传统高糖冰淇淋中，蔗糖不仅提供自然、纯净的甜味，也是固形物的重要组成部分，可以增大冰淇淋浆料的黏度，使得搅打充气后的冰淇淋具有一定的保持气泡的能力；同时使乳液油滴周围的水相含量和黏度增加，降低油滴间的碰撞频率，进而促进乳液体系的稳定[6]，减少乳析现象[7]，有利于最终冰淇淋产品的成形和抗融性。另外，小分子的蔗糖具有适度降低冰点的作用[8]，使冰淇淋在凝冻时形成大量细小的冰晶，这对最终冰淇淋形成柔软、顺滑的质地非常重要。鉴于糖独特而复杂的作用，对于在冰淇淋体系中的糖替代不应该仅停留在甜味替代层面，更应该考虑糖替代带来的质构改变从而制定应对策略。

市售的代糖冰淇淋一般选用糖醇、糊精或膳食纤维作为减少蔗糖后的固形物补充物质。Soukoulis 等发现除木糖醇和山梨糖醇外，大多填充剂代替部分糖后冰淇淋硬度增大，海藻糖、麦芽糊精、菊粉代糖的冰淇淋胶黏度增大、乳脂感增强[9]；Fuangpaiboon 等根据填充剂经验甜度和冰点降低能力，计算出与蔗糖相近甜度和冰点的填充剂组合（赤藓糖醇、菊粉和果糖）代替椰奶冰淇淋中的蔗糖，但最终配方仍然存在实际甜度不足、硬度较高、融化速率较慢、黏度较低的缺陷[10]。Moriano 等用填充型甜味剂部分和全部代替冰淇淋中的蔗糖，发现用海藻糖和赤藓糖醇代糖使冰淇淋硬度增大、融化速率减慢[11]。

到目前为止，关于代糖冰淇淋的研究多为部分代替蔗糖，对于全代糖冰淇淋配方的设计欠缺参考价值，并且多数研究在设置样品时欠缺对固形物含量的控制，导致样品之间的固形物含量不一，不能排除含量本身对于结果的影响，且大多研究缺乏对冰淇淋感官质构的评价分析。因此，为了系统地比较不同类型填充剂对冰淇淋样品的质构品质及其物理特性的影响，以蔗糖（质量分数 10%）作为对照，分别采用等量的山梨糖醇、赤藓糖醇、麦芽糖醇、木糖醇、抗性糊精、聚葡萄糖、麦芽糊精作为填充剂制备冰淇淋，研究不同填充剂对冰淇淋感官质构及物理特性的影响，旨在为全代糖冰淇淋填充剂的选择提供指导。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

全脂牛奶：内蒙古伊利实业集团股份有限公司产品；淡奶油、脱脂奶粉：新西兰恒天然集团产品；塔拉胶：浙江源丰生物科技公司产品；单双甘油脂肪酸酯：佳力士添加剂（海安）有限公司产品；蔗糖

酯:柳州爱格富食品生物股份有限公司产品;蔗糖:广州福正东海食品有限公司产品;木糖醇、赤藓糖醇:保龄宝生物股份有限公司产品;山梨糖醇:浙江华康药业股份有限公司产品;麦芽糖醇:山东福田糖醇有限公司产品;聚葡萄糖:泰莱食品配料(南通)有限公司产品;抗性糊精:健隆生物科技股份有限公司产品;麦芽糊精:河南中泰食化有限公司产品。

1.2 仪器与设备

TA-XT plus 物性分析仪:英国 Stable Micro Systems 公司产品;SU8100 冷场发射扫描电子显微镜:日本株式会社日立高新技术公司产品;RUNCHEN Frunt-N05 凝冻机:上海润辰实业有限公司产品;Panda Plus 2000 高压均质机:意大利 GEA Niro Soavi 公司产品;BD/BC-406E 变温冷冻冷藏箱:浙江星星冷链集成股份有限公司产品;DF-101T 集成式恒温磁力搅拌器:巩义市予华仪器有限责任公司产品;MTM2 微牵引力测定仪:英国 PCS instrument 公司产品;MAZ3000 激光粒度仪:英国马尔文仪器公司产品;DHR3 流变仪:美国 TA 仪器公司产品;ME104E 电子天平:梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司产品;IKA RW 20 D S025 悬臂式搅拌器:艾卡(广州)仪器设备有限公司产品;MP-501A 超级恒温槽:上海一恒科学仪器有限公司产品;Christ Alpha 1-4LDplus 冷冻干燥机:德国 CHRIST 公司产品;204 F1 差式扫描量热仪:德国耐驰仪器制造有限公司产品。

1.3 实验方法

1.3.1 冰淇淋基础配方 基础配方中脂肪、非乳脂固体、填充剂质量分数均为 10%,各原料的质量分数见表 1。其中,不同样品所用填充剂分别为蔗糖、山梨糖醇、赤藓糖醇、麦芽糖醇、木糖醇、抗性糊精、聚葡萄糖、麦芽糊精,制得样品分别记为 SUC、SOR、ERY、MAL、XYL、RD、PD、MD。

表 1 冰淇淋样品基础配方

Table 1 Basic formula for ice cream samples

原料	质量分数/%
全脂牛奶	64.00
脱脂奶粉	4.18
奶油	21.27
填充剂	10.00
塔拉胶	0.20
单双甘油脂肪酸酯	0.20
蔗糖酯	0.15

1.3.2 冰淇淋制作工艺 原料称量与混合:准确称取各原料,将干粉充分混合,牛奶和奶油混合后隔水加热至 65 ℃;化料:将混匀的干粉边搅拌边加入牛奶和奶油混合物中,高速搅拌 30 min 保证原料充分溶解;均质:混料保持 65 ℃左右均质,一级压力 18 MPa、二级均质压力 3 MPa;巴氏杀菌:混料在 75 ℃水浴中杀菌 15 min;老化:杀菌后的混料立即冷却并置于 4 ℃冰箱中冷藏 5 h;凝冻:将老化后的混料倒入凝冻机中凝冻,得到软质冰淇淋;硬化:将软质冰淇淋盛装于 5 cm×5 cm 的方形模具中,立即于-18 ℃下冷冻硬化,制作工艺见图 1。

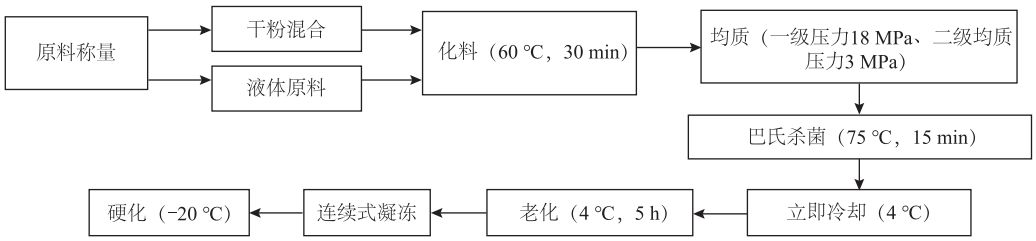


图 1 冰淇淋制作工艺

Fig. 1 Ice cream manufacture

1.3.3 冰淇淋质构定量描述性分析 在江南大学招募对感官评定感兴趣的志愿者 72 人。根据国标 GB/T16291.1—2012,通过基本灵敏度检验测试、描述能力测试等最终筛选出 10 人组成冰淇淋感官评价小组。参考 Soukoulis 等建立的冰淇淋质构感官描述词[12],经过评价员讨论,删除属性定义重复的、不能区分样品间差异的和喜好性的描述词,确定最终描述词,并在培训过程中明确每个描述词的定义和品尝方法,讨论每个属性的参照样及标度。

通过培训后,评估每个评价员的重复性、区分

能力,评价小组一致性,评估合格后开始测试样品,采用定量描述性分析的方法、15 点标尺对样品进行评估。

每次评价前,将冰淇淋样品从模具(5 cm×5 cm)中取出,盛放在 125 mL 一次性带盖纸杯中,用 3 位数随机编号。由于冰淇淋在品尝过程中融化较快,且处于不同融化状态下的冰淇淋质构差别较大,因此在评定中采用多次分批上样的方式呈递样品,每次分发样品和参照样后,评价不超过 3 个属性,然后重新分发样品及参照样,保证冰淇淋在质构保持一致的情况下进行评价,每次评价不超过 2 h。

1.3.4 冰淇淋物理特性测定

1)膨胀率测定　用相同的 60 mL 一次性杯子分别盛装冰淇淋浆料和软冰淇淋进行称量[13]。

$$P=\frac{m_0-m}{m}\times 100\% \quad (1)$$

式中:P 为膨胀率,%;m_0 为冰淇淋浆料的质量,g;m 为凝冻后相同体积软冰淇淋的质量,g。

2)硬度测定　模具中的样品于-18 ℃硬化,一周后取出,立即测定其硬度。探头型号为 P5/Cylinder stainless,触发力为 5 g,测试中探头速度为 3 mm/s,压缩距离为 20 mm。

3)粒径测定　采用 MAZ3000 激光粒度仪测定老化后冰淇淋浆料的粒径分布[13]。脂肪和水的折射率分别为 1.47 和 1.33,吸收值 0.001,遮光率为 9%~11%。

4)黏度测定　采用 DHR3 旋转流变仪测定老化后冰淇淋混料的黏度。选用直径为 40 mm、角度为 4°的椎板,在 4 ℃下测定其在 1~100 s^{-1} 剪切速率下的黏度变化[14]。由于低黏度食品的口腔感知剪切速率为 50 s^{-1}[15],因此将剪切速率为 50 s^{-1} 时的黏度作为样品的表观黏度。

5)热力学特性测定　采用 204 F1 差式扫描量热仪(DSC)测定冰淇淋浆料的 DSC 曲线。测试温度程序参考 Blond 等的方法略有改动[16],具体如下:室温下恒温 5 min;以 10 ℃/min 的速率降温到-100 ℃,再以 10 ℃/min 的速率升温到-40 ℃,恒温 30 min,之后以 10 ℃/min 的速率升温至 40 ℃。冰点(freezing point,FP)为样品融化峰上斜率变化最大点的切线与基线的交点,冰淇淋浆料的玻璃化转变温度为其最大冷冻浓缩液的玻璃化转变温度(glass transition temperature,T_g')[17]。

6)气泡和冰晶观测　取硬化一周后的块状样品,在-50 ℃以下冷冻干燥,将冻干后的样品浸没在液氮中,取出后切片,喷金,在真空下转移到扫描电子显微镜子下,观察样品经搅打充气后形成的气泡以及冰晶升华留下来的空隙[18]。每种样品取 5 张放大倍数为 200 的照片,统计视野内全部冰晶和气泡,计算气泡和冰晶的平均直径。

7)摩擦系数测定　采用 MTM2 微牵引力测定仪测定样品的摩擦系数。MTM2 的测量装置为球-碟接触(见图 2),可兼顾滚动和滑动两种测量方式[19]。

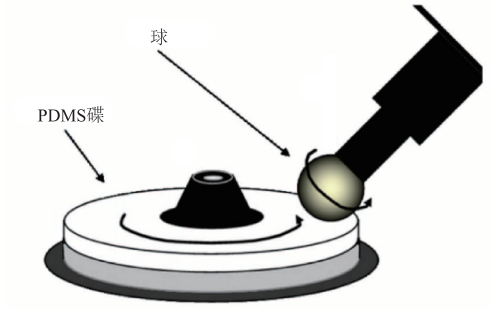


图 2　微型牵引测定仪(MTM)的示意图

Fig. 2　Schematic representation of the mini traction machine (MTM)

为了符合人品尝冰淇淋时的感官体验,测试前将样品置于 25 ℃水浴锅中搅拌融化至 0 ℃左右上样,此时冰淇淋样品冰晶充分融化,而脂肪结晶未被破坏,无相分离现象,与品尝过程中实际感受乳脂感、稠厚感及光滑度的时机相似。为了模拟真实口腔环境,选择摩擦副材料为聚二甲基硅氧烷,浴槽温度为 37 ℃,滑滚比为 50%,加载杆为低载杆(1~8 N),载荷为 3 N,夹带速率为 1~1 000 mm/s,加样量为 50 mL,测量结果以样品摩擦系数(μ)为纵坐标,夹带速度(U)为横坐标,生成 Stribeck 曲线[20-21]。夹带速度及滑滚比计算公式如下:

$$U=\frac{U_{球}+U_{碟}}{2} \quad (2)$$

$$R=\frac{U_{球}-U_{碟}}{U}\times 100\% \quad (3)$$

式中:$U_{球}$和 $U_{碟}$分别为球和碟的转速,mm/s;R 为滑滚比,%。

1.3.5 数据统计与分析

数据采用 Excel 2016 绘制图表。采用 XLSTAT 2019 进行方差分析、主成分分析、聚类分析、相关性分析。所有数据为 3 次重复实验所得,表中数据为平均值±标准偏差,不同字母表示样品之间差异显著(P<0.05)。

2 结果与讨论

2.1 填充剂对冰淇淋感官品质的影响

经过评价小组讨论后，最终确定 13 个冰淇淋质构属性,各个属性定义、参照样及标度见表 2。

根据所建立的质构属性描述词对 8 种冰淇淋样品进行评价。方差分析结果(见表 3)显示,代糖样品在硬度、可塑性、挖取黏度、铺展性、融化时间、泡沫感、乳脂感等属性上与 SUC 差异较大,在光滑度、稠厚感、冰晶感、黏度、冰凉感上差异较小。对质构属性进行主成分分析(见图 3(a))可知,挖取硬度、硬度、融化时间具有良好的正相关性,与铺展性、光滑度、可塑性、挖取黏度之间具有负相关性;而乳脂感与稠厚感具有良好的正相关性(P<0.05),与冰晶感呈负相关;黏度和泡沫感呈正相关(P<0.05)。根据各个属性在主成分上的载荷可以得出,F1 主成分主要解释了与冰淇淋硬度和可形变性相关的属性,而 F2 主成分主要解释了与冰淇淋融化过程中的质感相关的属性。为了更直观地呈现样品间的质构差异，根据各属性强度对样品进行聚类分析（见图 3(b)),结合主成分分析结果,将样品分为 3 组,图 3(c) 为各组样品质构特点蛛网图（以 SUC 作为参照),第一组包括 SUC、PD、MAL、RD,具有适中的硬度、较高的可塑性和光滑度、较低的泡沫感和黏度,

表 2 冰淇淋质构描述词、定义及参照样

Table 2 Sensory descriptors, definition and reference of ice cream

属性	定义	参照样及标度
挖取硬度	将勺插入样品一半时用力的大小	BX(4 分)、ZX(8 分)、GM(12 分)
挖取黏度	样品拿出 5 min 后,用勺挖取时粘连性大小	GM(4 分)、ZX(9 分)、BX(12 分)
可塑性	用勺挖取时样品的可塑性程度	GM(4 分)、ZX(12 分)
硬度	样品置于舌头和上颚间挤压感受到的力	BX(6 分)、GM(11 分)
融化时间	样品在口中自然咀嚼至融化所用的时间	GM(8 分)
铺展性	样品在口中铺展开所用力的大小	BX(4 分)、GM(7 分)、ZX(12 分)
黏度	样品在口中咀嚼时感受到的糊口、粘连程度	ZX(7 分)、GM(10 分)
冰凉感	将样品置于舌头和上颚间挤压时冰凉、降温的直观感受,伴随一定麻木感	GM(6 分)、ZX(12 分)
冰晶感	用牙齿咀嚼样品感受到的冰晶大小或数量	BX(4 分)、ZX(10 分)
泡沫感	样品在口中融化时产生泡沫量的大小	ZX(4 分)、BX(10 分)
乳脂感	样品咀嚼过程中口腔内感受到的如涂抹脂肪般均匀细腻的口感	将奶油用牛奶稀释，奶油质量分数为 4%(3 分)、6%(7 分)、8%(10 分)、10%(13 分)
稠厚感	样品融化后的流动速度	果胶溶液中果胶质量分数为 0.3%(6 分)、0.5%(10 分)
光滑度	样品吞咽前后感受到的摩擦感、颗粒感强弱	GM(4 分)、ZX(7 分)、BX(10 分)

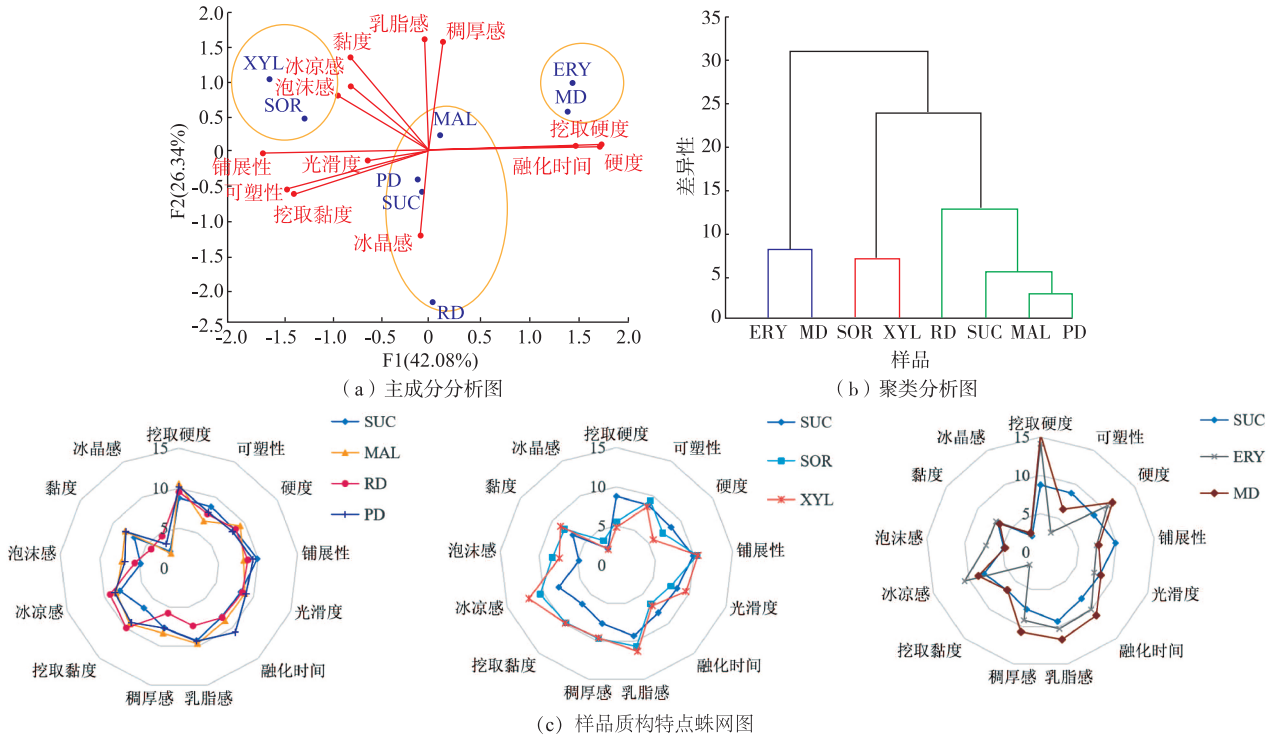
注:参照样中“BX”为八喜零蔗糖冰淇淋,“GM”为光明冰砖,“ZX”为甄稀杯装冰淇淋;样品在评价时均取等量的块状样品。

表 3 冰淇淋质构属性方差分析

Table 3 ANOVA analysis of the sensory texture attributes of ice cream samples

样品	挖取硬度	可塑性	挖取黏度	硬度	铺展性	融化时间	冰凉感	泡沫感	黏度	冰晶感	乳脂感	稠厚感	光滑度
SUC	8.8^{e}	8.7^{ab}	6.6^{b}	8.5^{d}	9.9^{ab}	8.1^{c}	7.9^{d}	4.8^{c}	6.8^{b}	2.4^{cd}	9.3^{e}	7.7^{c}	8.3^{b}
SOR	5.6^{f}	9.3^{a}	9.8^{a}	7.2^{e}	10.4^{a}	6.6^{d}	10.5^{b}	8.3^{a}	8.1^{a}	3.6^{b}	10.7^{bc}	9.6^{b}	7.5^{c}
ERY	14.1^{b}	2.9^{e}	2.2^{c}	10.7^{b}	7.4^{e}	10.0^{b}	10.6^{b}	7.2^{b}	7.1^{b}	2.7^{c}	10.3^{cd}	9.1^{b}	7.5^{c}
MAL	10.6^{c}	6.7^{d}	9.3^{a}	9.3^{c}	8.2^{de}	8.7^{c}	8.4^{cd}	7.2^{b}	8.2^{a}	2.1^{d}	9.7^{de}	8.3^{c}	8.8^{ab}
XYL	4.8^{f}	8.4^{b}	9.9^{a}	5.7^{f}	10.5^{a}	6.9^{d}	12.0^{a}	7.4^{b}	8.7^{a}	2.3^{cd}	11.3^{ab}	9.5^{b}	9.5^{a}
RD	9.5^{de}	7.7^{c}	10.0^{a}	8.6^{d}	8.7^{cd}	8.2^{c}	9.2^{c}	5.6^{c}	4.3^{c}	4.5^{a}	7.4^{f}	5.8^{d}	8.5^{b}
PD	10.2^{cd}	7.9^{bc}	9.0^{a}	8.1^{d}	9.4^{bc}	10.6^{ab}	8.6^{cd}	6.8^{b}	8.1^{a}	3.4^{b}	9.4^{de}	7.7^{c}	9.0^{ab}
MD	15.3^{a}	6.3^{d}	6.6^{b}	11.4^{a}	7.7^{e}	11.0^{a}	8.7^{cd}	4.7^{c}	6.5^{b}	2.8^{c}	11.7^{a}	10.7^{a}	8.5^{b}

注:同一列具有相同字母的样品间无显著差异(P>0.05)。



（a）主成分分析图　（b）聚类分析图

（c）样品质构特点蛛网图

图 3　样品质构属性分析

Fig. 3　Texture properties analysis of samples

但 RD 的冰晶感稍强，PD、MAL、SUC 质构轮廓最为接近；第二组为 XYL 和 SOR，与 SUC 相比具有较低的硬度和较高的泡沫感、铺展性、冰凉感、黏度、乳脂感等；第三组为 ERY 和 MD，与 SUC 相比具有较高的硬度、乳脂感和较低的可塑性、铺展性。

2.2　不同填充剂对冰淇淋物理特性的影响

2.2.1　膨胀率　冰淇淋凝冻过程中，连续高速的搅打使大量空气充入体系，冰淇淋体积膨胀。膨胀率受到配方、均质条件、凝冻条件（如空气阀开度、搅拌桨速度）等的影响[13]。由不同填充剂制得的冰淇淋膨胀率范围为 78.4%~84.8%（见表 4），相比于 SUC，除 ERY 具有显著较低的膨胀率（78.4%）外，其余样品均与 SUC 无显著性差异。适度的充气量增加了冰淇淋中可压缩分散相的体积，使冰淇淋对外界施加力产生的阻力更小[22]，并且还观察到膨胀率与冰淇淋硬度和可塑性呈正相关（P<0.05）。

2.2.2　硬度　根据表 4 可知，相比于 SUC，MD、ERY 和 RD 硬度较高，SOR、XYL、MAL 硬度较低，PD 与 SUC 硬度无显著性差异，这与实际挖取及品尝时的硬度表现一致。有研究表明，冰淇淋的硬度受到膨胀率、热特性、浆料流变学特性等因素的影响[22]。推测较低的空气充入量是导致 ERY 硬度较高的重要原因。对于麦芽糊精作填充剂导致的硬度增大，Soukoulis 等发现了类似的结果，并推测这是其高黏度、高玻璃化转变温度和较高冰晶分布均匀性的综合结果[9]。而较低的 T_g' 和 FP 是导致 SOR 和 XYL 硬度偏低的重要原因。

2.2.3　冰晶和气泡尺寸　冰晶和气泡是冰淇淋重要的微观结构元素[13]。在优质的冰淇淋结构中，大量细小的气泡和冰晶均匀地分布在连续的浓缩相中，形成细腻均匀的口感，气泡的平均直径为 20~50 μm，冰晶的尺寸应小于 50 μm[13]，直径大于 50 μm 冰晶的存在会导致品尝时的冰晶感、粗糙感，进而降低消费者的接受度[23]，较小的冰晶（10~20 μm）会提供较为理想的乳脂感[24]。

图 4 为不同填充剂制备的冰淇淋冻干后的表面，冰晶和气泡的平均大小见表 4。可以发现 ERY 样品截面的气泡较少，平均直径为 17.26 μm，相应地，其膨胀率显著低于其他样品。其他样品的气泡平均直径为 30~37 μm。较小的气泡使冰淇淋在口中融化较为均匀，且细小的气泡有助于人对乳脂感、稠厚感和冰凉感的感知。在冰晶方面，SUC、MD 的冰晶尺寸较小，SOR、XYL 冰晶尺寸较大，这可能是由于小分子填充剂（SOR、XYL）具有更强的降低

表 4　不同冰淇淋的物理性质

Table 4　Physical properties of different ice cream samples

样品	膨胀率/%	硬度/g	气泡平均直径/μm	冰晶平均尺寸/μm
SUC	84.6±2.8^{ab}	2 402.9±445.3^{d}	36.64±6.35^{a}	11.19±3.54^{c}
SOR	84.2±3.2^{ab}	1 675.6±368.2^{e}	32.98±6.66^{a}	15.12±5.39^{a}
ERY	78.4±4.1^{c}	7 393.9±516.9^{b}	17.26±4.93^{b}	11.98±7.61^{c}
MAL	79.4±1.6^{bc}	1 772.9±428.3^{e}	34.99±10.61^{a}	12.82±4.91^{bc}
XYL	81.7±4.1^{abc}	1 010.5±109.1^{f}	31.33±6.07^{a}	14.55±5.78^{a}
RD	79.4±2.2^{bc}	3 334.5±494.8^{c}	36.62±12.10^{a}	13.89±6.55^{ab}
PD	84.8±4.9^{a}	2 302.2±469.3^{d}	33.89±10.96^{a}	12.28±4.53^{bc}
MD	80.8±3.4^{abc}	14 071.6±748.4^{a}	32.10±13.06^{a}	11.58±4.09^{c}

注：同一列具有相同字母的样品间无显著差异（P>0.05）。

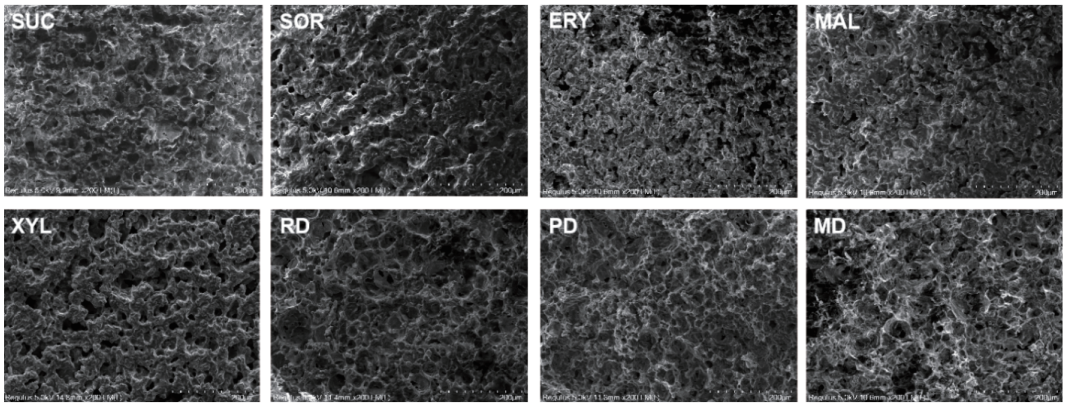


图 4　不同冰淇淋样品的截面结构

Fig. 4　Cross-section structure of different ice cream samples

冰点能力，在相同凝冻条件下会产生更少量的冰晶，另外，冰点更低的样品在储藏过程中会发生冰晶的生长[13]，导致冰晶尺寸增大。类似地，陈东等研究水溶液模拟冰淇淋制备升降温程序下形成的冰晶时发现，蔗糖、聚葡萄糖、麦芽糖醇可以形成较小而密集的冰晶（平均直径 7~12 μm），进而推测其在冰淇淋生产中可以形成细密的冰晶，进而提供绵密的口感，而木糖醇产生的冰晶体较大，较少用于冷冻食品中[25]。

2.2.4　摩擦特性　在食用液体或半固体食品的过程中，食物的流变特性和摩擦特性直接影响口腔感知。与口腔感知相关的摩擦现象可以通过摩擦学测量来理解，摩擦学特性一般通过 Stribeck 曲线[19]来阐述，该曲线描述了摩擦系数和摩擦变量组合（润滑膜夹带速度及黏度）之间的关系[19,26-27]。

对于非牛顿流体，其黏度是剪切速率的函数，然而摩擦接触中的精确间隙和剪切速率是未知的，因此无法测到特定夹带速度下的黏度，故绘制摩擦系数和夹带速度的曲线表征样品摩擦性能[19]。不同填充剂样品的 Stribeck 曲线见图 5。整体来看，蔗糖和糖醇类样品在夹带速度较低时摩擦系数较高；可溶性膳食纤维和麦芽糊精填充的样品摩擦系数较低，且在大范围夹带速度内波动较小，具有更高的润滑性能。根据 Peng 等人体饮水实验得到舌头在喝水时的平均速度为 10.34 mm/s[28-29]，考虑到仪器精确度，选择夹带速度为 20 mm/s 时的摩擦系数表征样品的摩擦性能。冰淇淋的摩擦系数测试预期模拟实际品尝时的感官体验，结果显示，在相同的夹带速度和载荷下，摩擦系数越低的样品，相应光滑度越高（r=-0.6），同样地，Rituja 等也发现水包油乳液的光滑度和摩擦系数呈现良好的负相关性[30]。对于摩擦系数与乳脂感的相关性，在该研究中未观察到，这一规律似乎在一些不同脂肪含量的乳液中更加明显，有研究者用橡胶环测量牛奶在相对速度为 10 mm/s 时的摩擦系数，发现脂肪质量分数在 1%~8%时，其乳脂感和摩擦系数线性相关[31]。对于

这一现象的物理机制，Dresselhuis 等认为较低的摩擦系数与乳液在口腔中发生聚集进而在口腔黏膜上形成脂肪涂层有关[32]。而另外一些研究认为黏度是驱动这一相关性的关键因素[27,33-34]，譬如Selway等提出了多尺度黏弹性润滑机制，认为黏度更大的流体通过黏滞曳力来延缓自身脱离摩擦接触面，并延缓贡献黏附作用分子相互作用破裂而减少摩擦[33]。总的来说，含有不同填充剂的乳液因黏度和口腔剪切敏感性的不同而造成口腔加工过程中脂肪聚集程度的差异，这可能导致其呈现出差异化的摩擦系数，进而影响冰淇淋的感官质构。

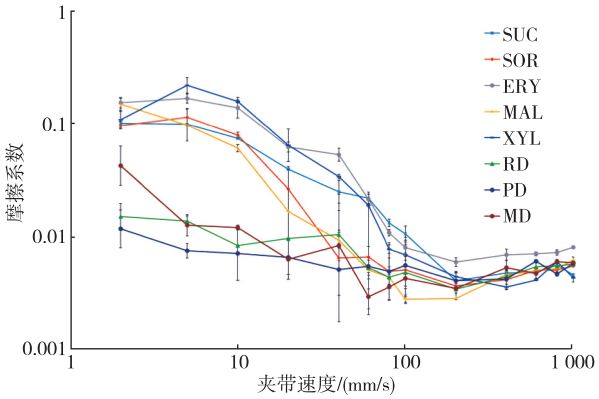


图 5　不同冰淇淋样品的 Stribeck 曲线

Fig. 5　Stribeck curves of different ice cream samples

2.3　不同填充剂对冰淇淋搅打前乳液性质的影响

2.3.1　黏度　浆料黏度影响冰淇淋的搅打过程、空气的充入和保留，对形成理想的冰淇淋质构至关重要。填充剂的保水能力、聚合程度等是影响冰淇淋浆料流变特性的关键因素[13]。过高的黏度可能影响凝冻过程中空气的充入，增加冰淇淋硬度。对比样品的黏度（见表 5）可以看出，相比于 SUC，MD 和 PD 的表观黏度更大，其中麦芽糊精增加黏度的效果最为明显，这与 Soukoulis 等的研究结果一致[9]。较高的黏度导致 MD 在凝冻过程中空气气泡的充入和保留相对困难，且冰淇淋的基质相黏度偏高，这是造成其较高感官硬度及较差挖取性质的重要原因。

2.3.2　粒径分布　各样品搅打前乳液的粒径分布显示（见表 5），蔗糖和糖醇类样品具有相对较小的粒径。崔娜等发现蔗糖对酪蛋白酸钠荧光强度有猝灭作用，可以降低酪蛋白酸钠的疏水性，增强乳化性，进而增强乳液的稳定性，并推测是由于蔗糖的多羟基结构更容易与水结合，从而在酪蛋白酸钠亲水基团表面形成一种纳米笼结构，使液滴之间不容易发生碰撞，增强稳定性[35]。类似地，在本研究中，推测蔗糖和糖醇类样品可能因为具有较强的吸湿性和较小的相对分子质量，从而使乳液稳定性更强，在相同工艺条件下，乳液聚集程度较低、粒径更小。

2.3.3　热力学性质　根据表 5，相比于 SUC，RD 和 MD 具有更高的 T_g'，而 SOR、ERY 和 XYL 的 T_g' 更低，与 Alvarez 等的结果一致[17]。T_g' 与冰淇淋储藏过程中的热力学稳定性相关[36]，较低 T_g' 的样品在储藏过程中容易发生冰晶的生长，如 SOR 和 XYL 样品，但 ERY 样品没有观察到这一规律，这可能与其较低的充气量有关。具有较低 T_g' 的样品在相同温度下，远离其最大冷冻浓缩浓度，水分子扩散运动较强烈，这可能是冰淇淋感官黏度和泡沫感增强的重要原因。冰点降低程度影响着初始形成冰晶的大小和初始热力学不稳定性，进而影响冰晶的生长，一般来说，冰点会随着基质相浓度的增加和溶质相对

表 5　含不同填充剂的冰淇淋搅打前乳液的物理性质

Table 5　Physical properties of emulsions before the whipping of ice cream with various bulking agents

样品名	表观黏度/(Pa·s)	$D_{(4,3)}$/μm	D_{90}/μm	T_g'/℃	冰点/℃
SUC	0.076±0.012^{cd}	1.12±0.19^{de}	2.15±0.91^{bc}	−46.75±0.50^{e}	−3.79±0.09^{e}
SOR	0.075±0.009^{d}	0.96±0.04^{e}	1.64±0.02^{c}	−53.63±0.31^{d}	−5.33±0.08^{d}
ERY	0.079±0.004^{bcd}	1.16±0.13^{cde}	1.97±0.36^{bc}	−51.57±1.34^{cd}	−6.77±0.12^{f}
MAL	0.092±0.007^{bc}	1.34±0.21^{bc}	2.65±0.83^{b}	−45.58±2.45^{bc}	−4.00±0.04^{c}
XYL	0.078±0.006^{cd}	1.20±0.19^{bcde}	2.22±0.66^{bc}	−55.37±3.35^{d}	−5.74±0.03^{e}
RD	0.093±0.003^{bc}	1.23±0.20^{bcd}	2.42±0.82^{bc}	−38.00±3.10^{a}	−3.29±0.05^{b}
PD	0.096±0.007^{b}	1.39±0.14^{b}	2.71±0.69^{ab}	−39.31±1.61^{ab}	−3.43±0.04^{b}
MD	0.136±0.001^{a}	1.63±0.19^{a}	3.54±0.49^{a}	−33.73±0.35^{a}	−2.70±0.02^{a}

注：$D_{(4,3)}$表示平均粒度；D_{90} 表示分布曲线中累积分布为 90%时最大颗粒的等效直径；同一列具有相同字母的样品间无显著差异（P>0.05）。

分子质量的降低而降低[37]。在该研究中,相对分子质量较低的糖醇(如SOR、XYL)冰点较低,在感官评价中具有较快的融化速度和泡沫感,而相对分子质量较大的RD、PD、MD冰点较高,融化速度较慢。

3 结 语

在感官质构品质方面,聚葡萄糖、麦芽糖醇和抗性糊精与蔗糖的填充效果最为相近;赤藓糖醇和麦芽糊精填充样品的硬度较高、可塑性低、铺展性差,可能分别与其较低的膨胀率、较大的浆料黏度和粒径有关;具有更低冰点和玻璃化转变温度的山梨糖醇和木糖醇样品初始冰晶量更少,在储藏过程中更不稳定,冰晶易生长,所制冰淇淋的硬度低、黏度大、泡沫感强。膳食纤维和糊精样品的摩擦系数较小,具有更高的润滑性能,可能是由于其黏度高和粒径较大所致。研究表明,麦芽糖醇作为填充剂可以较好地代替蔗糖,此外,可以适当与聚葡萄糖、抗性糊精复配使用,以提高冰淇淋浆料的黏度和粒径,增加冰淇淋润滑程度,降低泡沫感。

参考文献:

[1] FOWLER S P,WILLIAMS K,RESENDEZ R G,et al. Fueling the obesity epidemic? Artificially sweetened beverage use and long-term weight gain[J]. **Obesity**,2012,16(8):1894-1900.

[2] MALIK V S,PAN A,WILLETT W C,et al. Sugar-sweetened beverages and weight gain in children and adults:a systematic review and meta-analysis[J]. **American Journal of Clinical Nutrition**,2013(4):1084-1102.

[3] MATILDE O L,GABRIEL C,JULI N G,et al. Functional and morphological changes in endocrine pancreas following cola drink consumption in rats[J]. **Plos One**,2015,10(3):1-13.

[4] BHUPATHIRAJU S N,PAN A,MALIK V S,et al. Caffeinated and caffeine-free beverages and risk of type 2 diabetes[J]. **American Journal of Clinical Nutrition**,2013(1):155-166.

[5] MAKI K C,NIEMAN K M,SCHILD A L,et al. Sugar-sweetened product consumption alters glucose homeostasis compared with dairy product consumption in men and women at risk of type 2 diabetes mellitus[J]. **The Journal of Nutrition:Official Organ of the American Institute of Nutrition**,2015,145(3):459-466.

[6] KIM H J,DECKER E A,Mcclements D J. Influence of sucrose on droplet flocculation in hexadecane oil-in-water emulsions stabilized by β-lactoglobulin[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**,2003,51(3):766-772.

[7] 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.

[8] CLEMENS R A,JONES J M,KERN M,et al. Functionality of sugars in foods and health[J]. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**,2016,15(3):433-470.

[9] SOUKOULIS C,RONTOGIANNI E,CONSTANTINA T. Contribution of thermal,rheological and physical measurements to the determination of sensorially perceived quality of ice cream containing bulk sweeteners[J]. **Journal of Food Engineering**,2010,100(4):634-641.

[10] FUANGPAIBOON N,KIJROONGROJANA K. Qualities and sensory characteristics of coconut milk ice cream containing different low glycemic index(GI) sweetener blends[J]. **International Food Research Journal**,2015,22(3):1138-1147.

[11] MORIANO M E,ALAMPRESE C. Honey,trehalose and erythritol as sucrose-alternative sweeteners for artisanal ice cream: a pilot study[J]. **LWT - Food Science and Technology**,2017,75:329-334.

[12] SOUKOULIS C,LYRONI E,TZIA C. Sensory profiling and hedonic judgement of probiotic ice cream as a function of hydrocolloids,yogurt and milk fat content[J]. **Optics Communications**,2010,43(9):1351-1358.

[13] GOFF H D,HARTEL R W. Ice cream:seventh edition[M]. New York: Springer,2013.

[14] JIANG J,JIN Y,LIANG X,et al. Synergetic interfacial adsorption of protein and low-molecular-weight emulsifiers in aerated emulsions[J]. **Food Hydrocolloids**,2018,81(8):15-22.

[15] STANLEY N L,TAYLOR L J. Rheological basis of oral characteristics of fluid and semi-solid foods:a review[J]. **Acta Psychologica**,1993,84(1):79-92.

[16] BLOND G. Mechanical properties of frozen model solutions[J]. **Journal of Food Engineering**,1994,22(1):253-269.

[17] ALVAREZ V B,WOLTERS C L,VODOVOTZ Y T,et al. Physical properties of ice cream containing milk protein concentrates

[J]. **Journal of Dairy Science**，2005，88(3)：862-871.
[18] CAILLET A，COGN C，ANDRIEU J，et al. Characterization of ice cream structure by direct optical microscopy: influence of freezing parameters[J]. **LWT - Food Science and Technology**，2003，36(8)：743-749.
[19] SELWAY N，STOKES J R. Insights into the dynamics of oral lubrication and mouthfeel using soft tribology：differentiating semi-fluid foods with similar rheology[J]. **Food Research International**，2013，54(1)：423-431.
[20] CASSIN G，HEINRICH E，SPIKES H A. The influence of surface roughness on the lubrication properties of adsorbing and non-adsorbing biopolymers[J]. **Tribology Letters**，2001，11(2)：95-102.
[21] MALONE M E，APPELQVIST I，NORTON I T. Oral behaviour of food hydrocolloids and emulsions. Part 1. Lubrication and deposition considerations[J]. **Food Hydrocolloids**，2003，17(6)：763-773.
[22] HARTEL R W，MUSE M，SOFJAN R. Effects of structural attributes on hardness and melting rate of ice cream[J]. **Bulletin of the International Dairy Federation**，2004，401: 124-139.
[23] COOK K L K, HARTEL R W. Mechanisms of ice crystallization in ice cream production[J]. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**，2010，9(2)：213-222.
[24] EISNER M，WILDMOSER H，WINDHAB E J. Air cell microstructuring in a high viscous ice cream matrix[J]. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**，2005，263(3)：390-399.
[25] 陈东，苏蕾，刘爱国. 糖和糖醇对冰晶体大小的影响[J]. 食品研究与开发，2018，39(15)：44-49.
[26] 汪琦，朱扬，陈建设. 口腔软摩擦理论与测量技术及其在食品感官感知研究中的应用[J]. 食品科学，2021，42(9)：222-232.
[27] SHEWAN H M，PRADAL C，STOKES J R. Tribology and its growing use toward the study of food oral processing and sensory perception[J]. **Journal of Texture Studies**，2020，51(1)：7-22.
[28] PENG C L，JOSTBRINKMANN P G, MIETHKE R R，et al. Ultrasonographic measurement of tongue movement during swallowing[J]. **Journal of Ultrasound in Medicine**，2000，19(1)：15-20.
[29] HIIEMAE K M，PALMER J B. Tongue movements in feeding and speech[J]. **Critical Reviews in Oral Biology and Medicine**，2003，14(6)：413-429.
[30] RITUJA U，CHEN J. Smoothness as a tactile percept：correlating 'oral' tribology with sensory measurements[J]. **Food Hydrocolloids**，2019，87: 38-47.
[31] CHOJNICKA-PASZUN A，JONGH H，KRUIF C. Sensory perception and lubrication properties of milk：influence of fat content [J]. **International Dairy Journal**，2012，26(1)：15-22.
[32] DRESSELHUIS D M，HOOG E，STUART M，et al. The occurrence of in-mouth coalescence of emulsion droplets in relation to perception of fat[J]. **Food Hydrocolloids**，2008，22(6)：1170-1183.
[33] SELWAY N，CHAN V，STOKES J R. Influence of fluid viscosity and wetting on multiscale viscoelastic lubrication in soft tribological contacts[J]. **Soft Matter**，2017，13(8)：1702-1715.
[34] DOUAIRE M，STEPHENSON T，NORTON I T. Soft tribology of oil-continuous emulsions[J]. **Journal of Food Engineering**，2014，139(10)：24-30.
[35] 崔娜，文鹏程，郭慧媛，等. 蔗糖对酪蛋白结构及其乳化性影响的光谱学分析[J]. 光谱学与光谱分析，2017，37(10)：3127-3132.
[36] HAGIWARA T，HARTEL R W. Effect of sweetener，stabilizer，and storage temperature on ice recrystallization in ice cream[J]. **Journal of Dairy Science**，1996，79(5)：735-744.
[37] HARTEL R W. Crystallization in foods[M]. US: Aspen Publishers, 2002.