

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2023.04.009

范军营, 尹永智, 逯彩云, 等. 脂肪替代物在低脂冰淇淋中的应用研究进展[J]. 粮油食品科技, 2023, 31(4): 63-68.

FAN J Y, YIN Y Z, LU C Y, et al. Research progress of fat substitutes in low fat ice cream[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2023, 31(4): 63-68.

脂肪替代物在低脂冰淇淋中的应用研究进展

范军营, 尹永智✉, 逯彩云, 崔 醒, 韩喜艳, 王 斌

(大咖国际食品有限公司, 河南 焦作 454850)

摘要: 冰淇淋作为一种复杂的多相食品, 由分散在半冷冻溶液中的脂肪球、气泡和冰晶组成。其脂肪含量通常为 8%~16%, 在冰淇淋体系中起着重要作用。然而, 脂肪摄入过多会对健康造成不利影响, 因此采用脂肪替代物部分或全部代替冰淇淋中的脂肪成为研究热点。综述了近年来国内外学者对于冰淇淋中脂肪替代物的研究进展, 侧重于不同类型脂肪替代物的介绍, 以及脂肪替代物对低脂冰淇淋理化和感官特性的影响, 总结了其应用情况, 并对未来的研发方向和重点进行了展望。

关键词: 冰淇淋; 低脂; 脂肪替代物; 应用

中图分类号: TS252.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2023)04-0063-06

网络首发时间: 2023-05-31 17:41:55

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.3863.TS.20230531.0849.002.html>

Research Progress of Fat Substitutes in Low Fat Ice Cream

FAN Jun-ying, YIN Yong-zhi✉, LU Cai-yun, CHUI Xing, HAN Xi-yan, WANG Bin

(D.Co International Food Co., Ltd, Jiaozuo, Henan 454850, China)

Abstract: As a complex multiphase food, ice cream is composed of fat globules, bubbles and ice crystals dispersed in a semi-frozen solution. The fat content is usually 8%~16%, which plays an important role in the ice cream system. However, excessive fat intake can have a negative impact on health, so the use of fat substitutes to replace part or all of ice cream fat has become a research focus. This paper reviewed the research progress of fat substitutes in ice cream by domestic and foreign scholars in recent years, and focused on the introduction of different types of fat substitutes, as well as the effects on the physicochemical and sensory characteristics of low-fat ice cream. The applications were summarized and the future research direction and focus were also prospected.

Key words: ice cream; low-fat; fat substitutes; application

收稿日期: 2023-03-23

基金项目: 大咖国际食品有限公司自筹经费 (2022-XM-CP-008)

Supported by: Self Raised Funds by the D.Co International Food Company (No. 2022-XM-CP-008)

作者简介: 范军营, 男, 1985 年出生, 工程师, 研究方向为食品开发。E-mail: fanjunying@mxbc.com

通讯作者: 尹永智, 女, 1983 年出生, 硕士, 副高级工程师, 研究方向为食品饮料、乳制品。E-mail: yinyongzhi123@163.com

冰淇淋因其冰爽、细腻的口感和香甜的风味成为世界各地非常受欢迎的食物,预计到 2024 年全球冰淇淋销售额将达到 750 亿美元^[1]。脂肪是冰淇淋的重要组成成分,对冰淇淋的口感、风味、质地和抗融性等起着重要作用。普通冰淇淋的脂肪含量在 8%~16%,但脂肪摄入过多,会增加肥胖、高血压、心血管和其他相关疾病风险。随着人们对油脂与健康的认识不断提高,对低脂冰淇淋的需求日益增加。单纯降低冰淇淋的脂肪含量会使冰淇淋的质构、风味和口感变差,因此研究者们对冰淇淋的配方进行了优化,使用脂肪替代物部分或全部替代冰淇淋中的油脂,降低冰淇淋成品因为脂肪减少或去除而产生的不良特性,以便在不牺牲消费者感官的情况下生产出质量和营养良好的新型低脂冰淇淋。

脂肪替代物可按照其化学性质和功能分为碳水类、蛋白类、不饱和脂质或者不同类型混合等类型。碳水化合物类脂肪替代物是以碳水化合物经物理、化学处理,所得到的模拟油脂的油状液体系,但由于这类产品带有异味,所以用量受到一定的限制,脂肪替代率限制在 50%~75%;蛋白质类脂肪替代物是以蛋白质为原料,经物理、化

学处理,所得到的模拟油脂油状液体系,其热稳定性好,可代替冰淇淋中 75%~100%的脂肪含量;以脂肪为基质的脂肪替代物是使用其他脂肪或类脂物代替冰淇淋中的高热量乳脂,有复配脂肪、脂肪酸酯、油凝胶、结构性脂类等多种形式,种类繁多,且各有特点;另一种为基于碳水化合物和蛋白质(麦芽糊精,胶体,乳清蛋白等)及其混合物的不同类型的脂肪替代物,相比于单一脂肪替代物,使用几种替代物的混合物可能是最佳解决方案。

1 蛋白质基质脂肪替代物

蛋白质模拟脂肪可能存在两种机制:其一为蛋白质经过湿热、蛋白酶水解、改变 pH 等物理、化学改性后,使蛋白质大分子中的疏水基团暴露在分子集团表面,产生类似油脂的疏水特性,同时提高了蛋白质的乳化性。另外,蛋白质分子缔合形成络合物,体系形成凝胶,然后经过高剪切技术作微粒化处理,形成平均直径小于 10 μm 的超微蛋白质颗粒,能够很好模拟脂肪润滑、细腻的口感,如图 1^[2];另一种为当蛋白质和胶类物质相互作用形成凝胶,再经过微粒化,从而提供类似脂肪的质地和滑腻感。

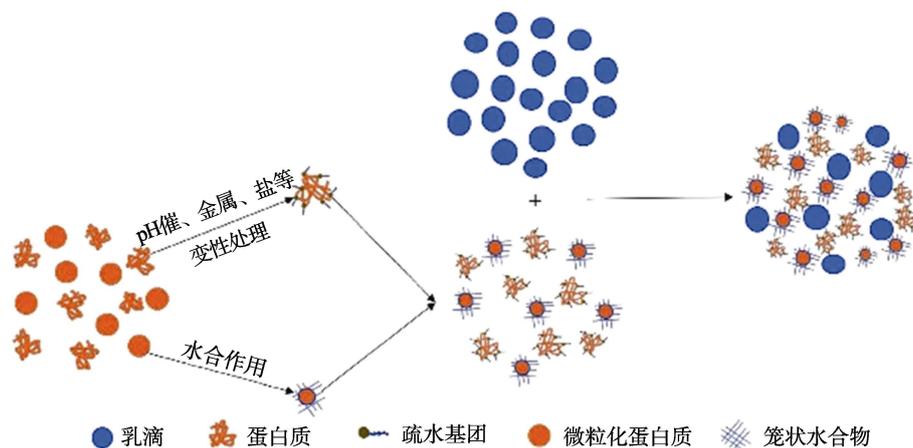


图 1 蛋白质类脂肪替代物模拟机制示意图^[2]

Fig.1 Principle of protein-based fat substitute replacement^[2]

乳清蛋白作为脂肪替代物可改善食品的持水性及乳化性,特别适用于冰淇淋等冷饮制品中,Raziuddin M 等^[3]的研究表明,脂肪替代率为 40% 时,冰淇淋的感官品质与乳清蛋白混合物的添加量没有显著差异;替代 20% 脂肪后,没有显示出

显著的颜色变化,而冰淇淋的黏度随着乳清蛋白脂肪替代的增加而呈下降趋势。A. S. Akalın 等^[4]使用浓度更高的分离乳清蛋白进行替代,结果低脂冰淇淋粘度增加,硬度和抗融性得以显著提高。在风味方面,合适的乳清蛋白含量具有类似于全

脂冰淇淋的风味释放水平。S. Feyzi 等^[5]的研究表明,用分离乳清蛋白替代 5%脂肪后,低脂轻藏红花冰淇淋的香气传递不受分离乳清蛋白的影响。

为了更好的模拟脂肪球的感官特性,常将微粒乳清蛋白(直径小于 5 μm)作为低脂冰淇淋中的脂肪替代物。E. A. Prindiville 等^[6]用 2.5%的 Dary-Lo(热变性乳清蛋白浓缩物)或 Simplese(微粒乳清蛋白)加入冰淇淋中,结果显示在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 贮藏过程中,含有微粒乳清蛋白的冰淇淋更能保持与含有乳脂的冰淇淋相似的质地。同时微粒乳清蛋白与多糖结合在替代冰淇淋中脂肪时显示出协同作用。例如,在 V. Aykan^[7]的研究中,相对仅有微粒乳清蛋白的脂肪含量 6%的低脂冰淇淋来说,使用微粒乳清蛋白与菊粉的组合制备的产品具有更好的抗融性、更高的硬度。同样的,在 B. K. Liou and I. U. Grün^[8]的研究中,微粒乳清蛋白与聚葡萄糖混合物的冰淇淋在风味特征上更接近低脂冰淇淋,兼具与全脂冰淇淋相似的质地特性。

除乳清蛋白外,大豆蛋白、玉米蛋白、藻蓝蛋白等植物蛋白经过物理或化学处理后也可作为冰淇淋中的脂肪替代物使用。如尤燕莉^[9]使用全大豆以 30%的比例替代冰淇淋配方中的奶粉,使棕榈油添加量从 8%降至 4%~6%,膨胀率和融化率变化不显著,但抗融性得到显著改善(65.76%)。

2 基于碳水化合物的脂肪替代物

碳水化合物类脂肪替代物种类繁多,且各有特点,碳水化合物类模拟脂肪并不像蛋白质模拟油脂的疏水特性,其一是通过多糖凝胶分子束缚冰淇淋体系中的大量的游离水分子产生质感上类似油脂的口感,以及奶油状的流变特性;二是降低化合物(主要是蛋白质)的粒径,使其具有类似脂肪的滑腻口感^[10]。

2.1 菊粉

菊粉是具有末端葡萄糖单位的,通过 D-果糖经 β -(2-1) 键线性连接起来且不可消化的一种多糖,它可以结合水分子形成白色奶油状结构的粒子凝胶网络,特别适合用作食品中的脂肪替代物。

菊粉的添加会显著影响冰淇淋体系的物理特

性。G. El-Nagar 等^[11]分别用 0%、5%、7%、9%的菊粉代替冰淇淋中 5%的脂肪,结果表明,适用范围内添加菊粉显著增加了冰淇淋浆料的黏度,同时降低了冰淇淋的融化速率,且其变化程度与菊粉的浓度相关。赵雯^[12]同样指出菊粉的添加可增强体系稳定性,使体系中的颗粒尺寸较小且集中,平均粒径从 233.7 nm 大幅降低至 82.6 nm。

L. A. Schaller-Povolny 和 D. E. Smith 等^[13]采用感官分析手段研究了菊粉对低脂冰淇淋在感官方面的影响,结果显示菊粉的加入会增加咀嚼性,且在 6 周的波动温度储藏过程中抑制了冰晶的形成,但菊粉的加入降低了风味相关的特性。在最近的一项研究中,R. S. Samakradhamrongthai 等^[14]优化了菊粉含量在低脂冰淇淋中的使用,糖、鲜奶油和菊粉的优化含量分别为 8.58%、22.18%和 4.02%,优化后可取得中等感官评分(6.90~7.20 分),与不含菊粉的冰淇淋相比,脂肪含量降低了 2.30%,降至 13.87%,硬度显著升高,其感官品质也在可接受范围内。

2.2 淀粉类

天然淀粉经物理、化学改性从而稳定其免受加热、剪切、冷冻或储存的影响,有相关研究支持改性淀粉用作脂肪替代物,A. Surendra Babu 等^[15]研究了采取不同水平柠檬酸处理甘薯淀粉作为脂肪替代物,结果表明在所有减脂冰淇淋中添加 1%甘薯改性淀粉后,硬度值从 13.05 N 提高至 26.25 N,且感官总分表明,在储存期结束时,具有 1%甘薯改性淀粉的减脂冰淇淋具有与高脂冰淇淋相似的理化特性和感官接受度(感官得分分别为 97.27、104.00 分)。

麦芽糊精是通过玉米淀粉的部分水解产生的,DE<20,具有脂肪替代特性的麦芽糊精的 DE<10。M. L. Rolon 等^[16]评估了用麦芽糊精代替脂肪对冰淇淋部分物理特性和消费者接受度的影响,结果表明脂肪粒径和脂肪不稳定性随着脂肪含量的增加而显著增加,但储存后,脂肪含量为 6%、12%和 14%的冰淇淋与新鲜冰淇淋相比在可接受性上没有差异。

2.3 纤维素衍生物

纤维素是一种由 β -(1-4) 糖苷键连接的重复

d-吡喃葡萄糖单元的生物聚合物。现如今,天然纤维素经物理或化学处理得到的微晶纤维素、甲基纤维素和羟丙基甲基纤维素等衍生物已广泛用于食品工业,其中一部分用途就是作为冰淇淋中的脂肪替代物。Tainara de Moraes 等^[17]采用橙纤维作为一种新型脂肪替代物,1.0%橙纤维降低了50%脂肪含量,并且降低了冰淇淋的膨胀率、提高硬度、弹性值,但不影响样品的粘附性和气味,冰淇淋总体接受度与对照冰淇淋没有差异。

对微晶纤维素进一步处理可得到的纳米微晶纤维素(NCC),其直径一般小于100 nm,具有高亲水性、超精细结构和高透明性等优点。在陈龙^[18]的研究中,其经过特殊处理的纳米微晶纤维素其外形酷似奶油,具有一系列与油脂类似的特性,并发现NCC添加量为0.7%的脂肪替代效果最好。

当对纤维素的分层结构进行化学或机械解构时,可产生纤维素纳米纤维,与微晶纤维素和纳米微晶纤维素相比,纤维素纳米纤维更灵活且结晶性更低。Velásquez-Cock, J 等^[19]在低脂冰淇淋添加0.15%和0.3%的纤维素纳米纤维,所得到的低脂样品的感官性能有了明显改善,并提高了抗融性,波动温度储存下的储存性能也显著提升。原因可能为纤维素纳米纤维增加了混合物和融化的冰淇淋黏度,从而可以更好地润滑口腔,减少冰晶的摩擦并掩盖其不愉快的感觉。

纤维素类脂肪替代物几乎不含热量,添加量少且对蛋白质和脂肪的消化有明显的抑制作用,非常适用于高脂的冰淇淋产品中。

2.4 胶体类

亲水胶体能够与水相互作用,并通过结合游离水影响冷冻甜点的物理,流变和感官特性,并降低水的流动性,控制在储存过程中发生再结晶现象所导致冰晶平均尺寸增加和产品质量特性恶化的情况。N. S. M. Razali 等^[20]使用秋葵胶以0%、22%、44%、55%、88%和100%替代冰淇淋中的脂肪,发现秋葵胶冰淇淋在融化速率和质构分析方面与全脂冰淇淋相当,感官结果表明,用秋葵胶替代55%脂肪可以获得令人满意的风味和细腻

润滑的口感。M.S. Marzieh 等^[21]使用丹参籽胶作为脂肪模拟物来开发功能性低脂冰淇淋,结果表明添加丹参籽胶作为天然的脂肪替代物和稳定剂,显著改善了冰淇淋的风味,冰淇淋口感更加细腻润滑。

亲水胶体常常作为增稠剂、稳定剂和凝胶剂应用在低脂冰淇淋,而不是直接代替脂肪,也因此使用量较少(0.1%~0.5%),主要是改善低脂的冰淇淋的质构以及流变特性,且不同胶体之间往往有协同作用,两种或多种不同胶体的组合往往比单独使用一种胶体对低脂冰淇淋的改善效果更好。

3 基于脂肪的脂质替代物

脂肪为基质的脂肪替代物种类繁多,有复配脂肪、脂肪酸酯、油凝胶、结构性脂类等多种形式,且各有特点。

3.1 油凝胶

在液态植物油加入凝胶剂,使之形成三维网络结构,阻止液态油的流动,形成具有固态脂肪特性的油凝胶,从而在冰淇淋中代替或部分代替固态脂肪。M. E. Moriano and C. Alamprese^[22]用植物甾醇和 γ -谷维素制成的葵花籽油凝胶替代牛奶奶油在冰淇淋中的使用,结果表明使用具有12%凝胶剂浓度的油凝胶可生产出质量特征与含有牛奶奶油的样品相当的冰淇淋,甚至得到了更好的膨胀率(从 $37.1\% \pm 0.8\%$ 升至 $42.4\% \pm 0.8\%$)和熔化开始时间(从 16 ± 1 min 升至 20 ± 1 min)。

3.2 脂肪酸酯

另一种脂肪类脂质替代物是以脂肪酸为基础经过酯化作用形成的类脂物。在冰淇淋中往往是将淀粉和脂肪酸进行酯化反应,如 M. Sharma^[23]将辛烯基琥珀酰酐和珍珠小米淀粉进行酯化,结果表明含有1.0%和2.0%OSA 酯化珍珠小米淀粉的软冰淇淋混合物的感官可接受性、溢出和融化特性方面与其他脂肪替代物相当,可作为低脂冰淇淋中的脂肪替代物。

3.3 复配脂肪

复配脂肪是最简单、最容易和最具成本效益

的脂肪修饰工艺, 多种植物油的混合物可以改变油的物理化学性质, 进而改变最终产品的技术功能, 以提供理想的感官属性。在油脂混合时, 油脂熔点的高低对油脂的混合效果影响很大, 直接影响它们的融合性。在相同的操作条件下, 冰淇淋中的油脂配比不同, 所得产品的感官特性、融化特性、膨胀率也不同。T. Hasan 等^[24]以 SFC(固体脂肪含量) 为标准, 发现 80/15/5 (PKO/SBO/PS33) (棕榈仁油/大豆油/棕榈硬脂碘值 33) 和 80/15/5 至 80/5/15 (PKO/SBO/PS38) (棕榈仁油/大豆油/棕榈硬脂碘值 38) 混合物在温度高于 20 °C 时具有与乳脂相似的 SFC, 能够在室温下提供与乳脂相似的融化和口感。

4 复合型脂肪替代物

复合型脂肪替代物比单使用一种具有更好的模拟脂肪的效果, 主要原因是通过蛋白质和碳水化合物的合理搭配, 从而协同增强低脂冰淇淋的感官特性(图 2)。其中蛋白质的脂肪替代物会产生小的球状颗粒 (<5 μm 直径), 以模拟脂肪球, 赋予类似于天然脂肪的口感; 碳水类替代物则通过形成凝胶结构和在食物系统中捕获大量游离水来发挥作用, 有助于减轻冰的结晶度, 并且降低化合物的粒径从而模仿低脂冰淇淋中奶油感。

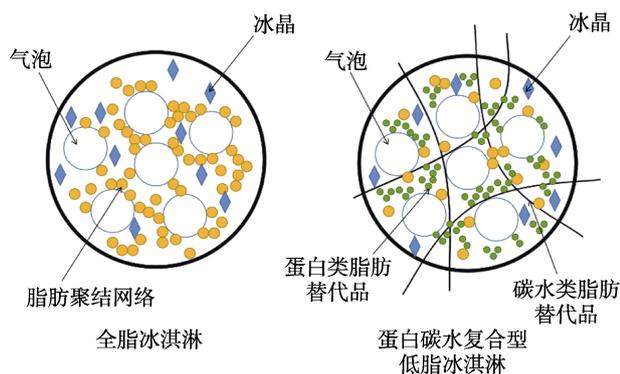


图 2 蛋白碳水复合型脂肪替代物在冰淇淋中的结构示意图

Fig.2 Structure of protein carbon water composite fat substitutes in ice cream

E. Mahdian 和 R. Karazhian^[25]使用 65% 的牛奶蛋白浓缩物和菊粉作为脂肪替代物生产脂肪含量为 5% 的低脂冰淇淋, 结果表明通过使用牛奶蛋白浓缩物和菊粉, 混合物的黏度和稠度系数增加, 冰淇淋硬度不受影响, 但膨胀率随着产品配方中

牛奶蛋白浓缩物和菊粉混合物含量的增加而降低。L. Yan 等^[26]对蛋白与胶体之间的协同作用进行了研究, 他们将大豆蛋白水解物和黄原胶制得的复合物用作脂肪替代物生产低脂冰淇淋, 结果发现黄原胶的加入显著提高了大豆蛋白水解物的起泡稳定性, 使大豆蛋白水解物/黄原胶体系乳化和起泡特性可以满足冰淇淋的熔融特性, 且其粒径小于 10 μm, 可以模拟冰淇淋中脂肪的奶油口感, 当大豆蛋白水解产物: 黄原胶=92:8、冷冻时间为 21.25 min 的低脂冰淇淋具有更好的融化特性和最接近全脂冰淇淋的感官得分(全脂为 24.40±1.36 分、低脂为 21.90±1.14 分)。Y. Guo 等^[27]研究了纤维素与蛋白之间在低脂冰淇淋中的协同作用, 他们将纳米细菌纤维素/大豆分离蛋白复合凝胶作为脂肪替代物, 研究表明与纯大豆分离蛋白相比, 纳米细菌纤维素/大豆分离蛋白复合物的热稳定性、织构性、流变性和乳化性能均有所提高, 当将 20% 的纳米细菌纤维素/大豆分离蛋白复合物加入冰淇淋中作为奶油替代物时效果最好。没有完美的配方可以完全替代冰淇淋中的脂肪, 但碳水化合物和蛋白质的复合物往往比单一使用一种替代物更能达到类似于全脂冰淇淋的质地与感官特性, 并且还有其他一些益处, 如额外的蛋白质来源、益生元纤维等。

5 结论

冰淇淋脂肪替代物种类繁多, 主要为碳水类、蛋白类、脂肪类脂质替代物三大类, 其主要目的是弥补因脂肪减少或去除而可能引起的产品的质地和感官缺陷。但多项研究表明, 单一的脂肪替代物不能适合所有的应用, 几种替代物的相互组合可能是最佳解决方案。

冰淇淋是一种复杂的食品体系, 脂肪替代物的添加对不同的产品应该采用不同的方案, 同时注重其食品安全问题, 在安全的前提下, 以感官为基础来确定使用效果、并且不断优化, 以满足消费者对低脂冰淇淋的口感、风味和质地的期望。

参考文献:

- [1] GENOVESE A, BALIVO A, SALVATI A, et al. Functional ice

- cream health benefits and sensory implications[J]. *Food Research International*, 2022, 161: 111858.
- [2] 马传国, 曹昕琪. 脂肪替代物在蛋黄酱中的应用研究进展[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(4): 119-127.
- MA C G, CAO X Q. Research progress in the application of fat substitutes in mayonnaise[J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*. 2022, 43(4): 119-127.
- [3] RAZIUDDIN M, ZANJAD P N, KHILLARI S A, et al. Quality of low-fat ice cream made with incorporation of whey protein concentrate[J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2008, 44(4): 391-393.
- [4] AKALIN A S, KARAGOZLU C, ÜNAL G. Rheological properties of reduced-fat and low-fat ice cream containing whey protein isolate and inulin[J]. *European Food Research and Technology*, 2008, 227(3): 889-895.
- [5] FEYZI S, VARIDI M, HOUSAINDOKHT M R, et al. A study on aroma release and perception of saffron ice cream using in-vitro and in-vivo approaches[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2020, 65: 102455.
- [6] PRINDIVILLE E A, MARSHALL R T, HEYMANN H. Effect of milk fat, cocoa butter, and whey protein fat replacers on the sensory properties of lowfat and nonfat chocolate ice cream[J]. *Journal of Dairy Science*, 2000, 83(10): 2216-2223.
- [7] AYKAN V, SEZGIN E, GUZEL-SEYDIM Z B. Use of fat replacers in the production of reduced-calorie vanilla ice cream[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2008, 110(6): 516-520.
- [8] LIOU B K, GRUN I U. Effect of fat level on the perception of five flavor chemicals in ice cream with or without fat mimetics by using a descriptive test[J]. *Journal of food Science*, 2007, 72(8): S595-S604.
- [9] 尤燕莉, 陈海英, 黄忠海, 等. 全大豆双蛋白冰淇淋的研制[J]. *食品与生物技术学报*, 2014, 33(11): 1176-1181.
- YOU Y L, CHEN H Y, HUANG Z H, et al. Development of dual-protein ice cream with whole soybean[J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2014, 33(11): 1176-1181.
- [10] 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]. 天津科技大学, 2021.
- [11] EL-NAGAR G, CLOWES G, TUDORICĂ C M, et al. Rheological quality and stability of yog-ice cream with added inulin[J]. *International Journal of Dairy Technology*, 2002, 55(2): 89-93.
- [12] 赵雯, 张健, 姜芸云, 等. 不同种类脂肪替代物对软冰淇淋浆料流变特性及产品品质和口感的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(12): 1-8.
- ZHAO W, ZHANG J, JIANG Y Y, et al. Effect of fat replacers on rheological properties of soft ice cream mixes and quality and mouthfeel of ice cream[J]. *Food Science*, 2018, 39(12): 1-8.
- [13] SCHALLER-POVOLNY L A, SMITH D E. Sensory attributes and storage life of reduced fat ice cream as related to inulin content[J]. *Journal of Food Science*, 1999, 64(3): 555-559.
- [14] SAMAKRADHAMRONGTHAI R S, JANNU T, SUPAWAN T, et al. Inulin application on the optimization of reduced-fat ice cream using response surface methodology[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 119: 106873.
- [15] BABU A S, PARIMALAVALLI R, MOHAN R J. Effect of modified starch from sweet potato as a fat replacer on the quality of reduced fat ice creams[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2018, 12(4): 2426-2434.
- [16] ROLON M L, BAKKE A J, COUPLAND J N, et al. Effect of fat content on the physical properties and consumer acceptability of vanilla ice cream[J]. *Journal of Dairy Science*, 2017, 100(7): 5217-5227.
- [17] CRIZEL T D, DE ARAUJO R R, RIOS A D, et al. Orange fiber as a novel fat replacer in lemon ice cream[J]. *Food Science and Technology*, 2014, 34(2): 332-340.
- [18] 陈龙. 纳米微晶纤维素作为脂肪替代品在冰淇淋中的应用[D]. 天津商业大学, 2015.
- CHEN L. Application of nanocrystalline cellulose in ice cream as fat substitute[D]. Tianjin University Of Commerce, 2015.
- [19] VELASQUEZ-COCK J, SERPA A, VELEZ L, et al. Influence of cellulose nanofibrils on the structural elements of ice cream[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 87: 204-213.
- [20] AZIZ N S, SOFIAN-SENG N S, KASIM K F, et al. Functionality of okra gum as a novel carbohydrate-based fat replacer in ice cream[J]. *Journal of Food Science and Technology research*, 2018, 24(3): 519-530.
- [21] MARZIEH M S, AMOHAMADISANI. Effect of salvia macrosiphonseed gum as a fat replacer on physico-chemical and sensory characteristics of lowfat ice cream[J]. *BioTechnology: An Indian Journal*, 2016, 12(4):519-530.
- [22] MORIANO M E, ALAMPRESE C. Organogels as novel ingredients for low saturated fat ice creams[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 86: 371-376.
- [23] SHARMA M, SINGH A K, YADAV D N. Rheological properties of reduced fat ice cream mix containing octenyl succinylated pearl millet starch[J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2017, 54(6): 1638-1645.
- [24] HASAN T, THOO Y Y, CHEW C L, et al. Blends of palm kernel oil, soybean oil and palm stearin as an alternative to milk fat for frozen dessert application[J]. *Journal of Food Science and Technology-Mysore*, 2022, 59(8): 3010-3019.
- [25] MAHDIAN E, KARAZHIAN R. Effects of fat replacers and stabilizers on rheological, physicochemical and sensory properties of reduced-fat ice cream[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology* 2013, 15(6): 1163-1174.
- [26] YAN L, YU D J, LIU R, et al. Microstructure and meltdown properties of low-fat ice cream: Effects of microparticulated soy protein hydrolysate/xanthan gum (MSPH/XG) ratio and freezing time[J]. *Journal of Food Engineering*, 2021, 291: 110291.
- [27] GUO Y, ZHANG X H, HAO W H, et al. Nano-bacterial cellulose/soy protein isolate complex gel as fat substitutes in ice cream model[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 198: 620-630. 
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。