

脂肪替代物在乳制品中的应用

张 璨, 杨 杨, 马春敏, 徐 悦, 边 鑫, 贺殷媛, 张 娜*
(哈尔滨商业大学食品工程学院 哈尔滨 150028)

摘要 乳制品为营养价值近乎完美的食品,是人类不可或缺的,而乳制品中较高的脂肪可能会对人体健康带来不利影响。随着健康意识的提升,人们开始热衷于低脂或减脂的生活方式。既能维持乳制品本身的美味口感及其质构特性、流变特性等功能特性,又能减少脂肪含量的脂肪代替物应运而生,并具有广阔的市场前景。本文综述脂肪替代物的分类和制备方法,其在乳制品中的应用,并展望其未来研究方向和前景。

关键词 乳制品; 脂肪替代物; 脂肪; 研究进展; 制备方法

文章编号 1009-7848(2024)11-0472-11 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.11.043

乳制品(巴氏杀菌乳、全脂乳粉、奶酪等)是以乳为主要原料,加入或不加入食品添加剂等辅料后加工制得的产品^[1]。这些产品具有维持膳食营养平衡,提供必需微量营养素和生物活性成分等优点,对维护健康有许多益处^[2]。乳制品行业在世界及我国消费市场上占有重要地位。据联合国粮食及农业组织(FAO)的报告,全球牛奶产量预计到2027年将增长22%^[3]。《中国农业展望报告(2023—2032)》预计未来10年,我国奶类消费量将持续增长,在2032年消费量将达到7902万t^[4]。乳制品脂肪含量较高,如酸奶、奶酪、奶油的脂肪含量分别为4%~10%,25%~35%和10%~80%之间。然而,高脂肪的摄入会对人体健康产生不利影响。近年来,一些研究表明过度摄入脂肪会对人体肠道、大脑、认知和行为产生影响,从而导致人们患肥胖、2型糖尿病、心血管疾病等疾病的风险提高^[5-8]。一些国家和国际机构建议经常食用无脂肪或低脂乳制品以保持个人健康^[9]。美国最新的《2020—2025年居民膳食指南》也提出要多吃低脂/脱脂牛奶或酸奶、奶酪^[10]。如今消费者已将低脂或减脂食品消费作为一种生活方式。为顺应这种趋势,制备低脂或减脂乳制品十分必要。

目前,直接减少脂肪含量,提高食品的饱腹感

和加入脂肪替代物,是降低脂肪摄入的主要方法。例如:通过在食品中添加膳食纤维和蛋白质;利用蛋白质的功能特性构建微观结构来改变食品的质地形态,从而影响人们的感官感受,提高食品的饱腹感,减少人们对食品的消耗量。然而,制备这类食物应注意纤维的选择和高蛋白对产品感官的不利影响^[11]。脂肪对乳制品的质地、风味和黏稠度产生直接影响,同时具有乳化作用,能有效地解决粗糙的口感、乳清分离等问题^[12],如奶酪中脂肪以小球体和不规则聚集体填充在由酪蛋白形成的三维网络中,从而软化奶酪的质地,同时为产生奶酪风味的脂肪酸风味物质提供原料^[13-14]。直接减少脂肪的乳制品通常具有较差的风味和色泽,降低了消费者对于低脂乳制品的接受度。因此,制备既低脂又具有良好感官的乳制品成为一个挑战。为了解决上述问题,脂肪代替物应运而生。脂肪代替物是一类既能够改善低脂食物的功能特性和感官特性,又可以降低脂肪含量和卡路里的物质^[15]。在乳制品加工中,脂肪代替物通常是通过部分或全部替代与乳制品混合,在不显著影响产品品质的情况下,提高产品的稠度和储藏稳定性。目前,大多利用蛋白质、多糖、液体油及其结构化油脂制备脂肪替代物,影响乳制品中蛋白质网络的形成,从而改善低脂乳制品的流变特性和质构特性。例如,中性多糖水解瓜尔胶通过增加凝胶网络中连续相的黏度充当蛋白网络结构的填料,阴离子多糖如橘皮纤维与酪蛋白相互作用,通过桥接作用加强酪蛋白网络,从而增强酸奶凝胶体系形成^[16-17]。在奶

收稿日期: 2023-11-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2100902-3);
国家自然科学基金项目(32072258)

第一作者: 张璨,女,硕士生

通信作者: 张娜 E-mail: foodzhangna@163.com

酪中,乳清蛋白通过微粒化制得的微小颗粒来提高持水性和滚珠轴承润滑减少摩擦,从而模拟脂肪球的润滑性^[18]。综上,脂肪替代物是研发新式低脂和无脂乳制品的一种有效手段。

近年来,低脂乳制品的设计和制备得到较广泛的研究,而对于脂肪替代物在多品类乳制品中应用效果和作用机制尚不清晰。本文综述脂肪替代物的制备和分类,并对其在乳制品中应用进行归纳总结,并展望其未来发展方向。

1 脂肪替代物分类及制备

脂肪替代物一般分为单一脂肪替代物和复合

脂肪替代物,其中单一脂肪替代物又可以分为脂肪代替品和脂肪模拟物两大类。脂肪代替品是以脂质为原料的脂肪替代物,可以 1:1 代替食品中脂肪(图 1b)。脂肪模拟物是指以蛋白质或者碳水化合物为原料制备的能够模拟脂肪的理化、质地和感官特性的脂肪替代物^[19],主要通过以下 2 种途径代替脂肪(图 1c):1)由于蛋白质和碳水化合物都是本身具有特征性的物理化学和感官特性的大分子,二者可以通过保持其自身的不规则形态模拟脂肪;2)蛋白质和碳水化合物能够自然或者通过加工形成大小和形状与脂肪球和乳状液滴相类似的规则的球状微粒,从而用于模拟脂肪^[20-21]。

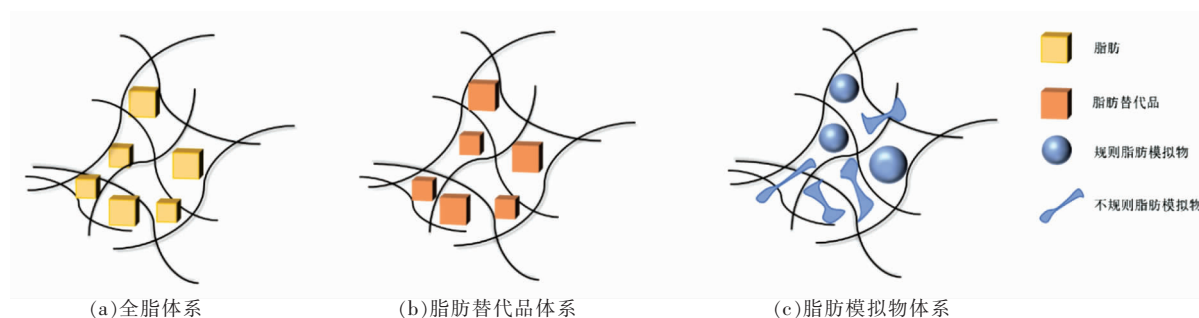


图 1 不同脂肪替代物的替代机理^[22]

Fig.1 The substitution mechanism of different fat replacers^[22]

1.1 单一脂肪替代物

1.1.1 脂质基脂肪代替物 脂肪替代品的生产拉开了食物中替代脂肪研究的序幕。脂肪替代品是以脂肪酸为基质通过酯化反应制成的一类物质,此类脂肪替代物通常不会被脂肪酶分解,从而不被人体吸收,具有极低的能量。由于其本身是油脂,具有和脂肪相似的物理性质和结构,具有优良的亲油性和热稳定性,有利于在油炸或烹饪过程中维持食品的口感、风味和形态^[23]。从添加效果来看,脂肪替代品可以代替全部脂肪,且种类丰富,制备简单,还可以根据个人健康情况选择合适的脂肪替代品^[24],因此是理想的脂肪代替物,比较典型的脂肪代替品为蔗糖聚酯。然而,脂肪替代品的生产成本较高,其中还存在人体难以消化脂肪替代品的酯键,容易增加腹泻和肛漏等风险,也会影响其它营养成分的吸收。

1.1.2 蛋白质基脂肪模拟物 蛋白质基脂肪模拟物主要以乳清蛋白、大豆蛋白等为原料,通过一定条件的改性,使其理化性质与脂肪更相似,再通过高剪切技术将改性后的蛋白进行微粒化处理,使其粒径范围在 0.05~5 μm ^[22],利用在此粒径范围的颗粒之间发生滚动和压缩行为,模拟脂肪特有的口感和质地。蛋白质本身具有良好的凝胶特性、乳化特性等功能特性使其适合替代脂肪,而改性能使蛋白质的这些特性得到提高。因此,热处理等物理改性、化学改性和酶解改性的方法常用于制备蛋白质基脂肪模拟物。化学改性大多通过改变蛋白质表面电荷,导致其空间结构伸展,疏水基团暴露,从而改善其功能特性。其中,糖基化改性的蛋白质在脂肪替代物方面具有很大潜力,因为糖基化反应后引入多糖导致疏水性改变,使蛋白质分子结构舒展,柔性增强,且在乳化过程中吸附在油

水界面,降低了界面张力,而提高了溶液的乳化性和起泡性^[25]。酶解改性能够很好地提升蛋白质的乳化性使其应用于乳制品中,然而由于此法具有较多限制条件,目前还未有成熟的技术制备脂肪模拟物。其中,乳制品中经常使用的蛋白质脂肪替代物是经过微粒化处理的蛋白颗粒,而这类模拟物很难和小分子物质相结合,常伴随有一定颜色和气味如豆腥味,且在高温下凝固硬化^[26],不能应用于高温产品中。

1.1.3 碳水化合物基脂肪模拟物 碳水化合物基脂肪模拟物是目前原料最广泛、价格低廉和安全性高的脂肪模拟物,其一般通过模拟脂肪口感在低脂食品中使用。碳水模拟脂肪口感通常采用微粒学说和三维网络结构学说2种机制解释这一过程。其中,微粒说是碳水化合物基脂肪模拟物模拟脂肪口感的机制之一,因为在颗粒粒径小于人舌头对颗粒感觉的阈值时(10~20 μm),食品会在口腔中产生类似脂肪润滑的感官。大米淀粉是微粒说机制的最好的原料,其粒径大小与脂肪球大小相似,且被糊化后具有良好的涂抹性^[27]。另一作用机制是将淀粉、胶体、纤维素等原料进行化学或者物理改性处理,使其与水结合形成能够截留住水分且具有三维网状结构的水凝胶,并通过良好的流动性来模拟脂肪的润滑度、黏度和口感^[28]。此外,部分碳水化合物基脂肪模拟物在食品体系网络结构中作为填充剂存在,使其在人口腔加工过程中具有与脂肪相似的柔软质地。同时还可以与食品体系中的成分相互作用,防止三维网络缩紧和重排而形成更加紧凑、致密的结构。例如,菊粉由于与水具有强结合能力,可使干酪内结合水含量增多,并促进凝胶形成,与蛋白质聚集体结合参与形成蛋白网络结构,使酪蛋白间的胶束作用下降,改变干酪的质地结构^[29]。由于此类脂肪模拟物必须与水作用进行制备,故不能用于高温油炸产品。

由此可见,单一脂肪模拟物除不能应用于高温食品外,还无法完全模拟脂肪的化学性质和质构,无法在分子水平上模拟脂肪。然而,单一脂肪模拟物的研究仍为后续脂肪模拟物的发展奠定了一定的研究基础。

1.2 复合脂肪替代物

复合脂肪替代物是通过不同种类原料来源物

质根据一定比例通过物理或者化学方法复合,协同发挥脂肪替代作用,互相弥补缺陷的脂肪替代物^[30]。近年来,由于脂肪替代物在食品中的日益广泛应用,以及脂肪在食品中所发挥的复杂作用和人们对食品品质日益提高的要求,学者们开始关注复合脂肪替代物的研究。已有研究表明,一些采用最佳配方制备的复合脂肪替代物能够展现出更全面的脂肪类似特性,并较单一脂肪替代物更接近全脂甜品的产品^[31]。

1.2.1 蛋白质-多糖复合脂肪替代物 复合脂肪替代物通常以蛋白质和多糖为原料,通过共价作用和非共价作用进行制备。共价复合的复合脂肪替代物可以通过酶促交联、化学交联和糖基化反应进行结合,共价复合的脂肪替代物一般比非共价复合的脂肪替代物更加稳定。然而,由于共价复合过程中酶促交联法的酶具有特异性,对底物具有特定的结合位点,且糖基化反应主要依托于美拉德反应,使得此过程需要多糖具有反应所需的酯结构,所以共价复合制备的脂肪替代物对于原料的选择不具有普适性。如图2中B区域所示,非共价复合的复合脂肪替代物主要通过共混复合方式进行制备,该方式利用不同电荷的蛋白质与多糖之间的静电相互作用,实现了复合脂肪替代物的高效制备,已成为研发复合脂肪替代物的常用技术之一。有研究表明带阴离子的果胶可以与表面带正电荷的微粒化乳清蛋白颗粒(MWP)紧密相互作用形成复合脂肪替代物。在脂肪替代物中,MWP均匀分布在由果胶分子形成的稳定三维网络中^[32]。除此之外,复合脂肪替代物具有良好的功能特性,在一定pH值条件下蛋白质和多糖之间产生静电吸引力导致蛋白质的多肽链展开,从而改变其在油水界面的吸附量,进而提高乳化性和乳化稳定性^[33]。

1.2.2 油凝胶及乳液凝胶 除上述由蛋白质和多糖复合制备的水凝胶外,液相为油的油凝胶和乳液凝胶在低脂食品开发中具有很大潜力^[34]。凝胶油作为结构化油,既能够保持液体油原本的化学特性,减少食品中有害的饱和脂肪,又可以制备更稳定、具有较长保质期的食品。其中,油凝胶是液体油通过使用少量一种或多种有机凝胶剂被包裹在三维网络中,从而形成具有黏弹性和疏水性的

表 1 蛋白质和多糖复合的脂肪模拟物交联方式

Table 1 Crosslinking method of fat mimetics composed of proteins and polysaccharides

相互作用类型	制备方法	特点
非共价相互作用	共混复合(自组装法)	简单、高效,不使用其它化学试剂,是一个完全绿色的制备方法,具有普适性 ^[32]
共价相互作用	酶促交联法	虽然特异性强和反应条件温和,但成本较高,对原料有要求 ^[33]
	化学交联法	虽然交联反应性强、成本低、交联效率高,但是化学试剂可能会带来刺激性等健康隐患 ^[33]
	糖基化法	美拉德反应 虽然制备的复合物更稳定,但糖基化大多依托于美拉德反应,反应的进程难以控制,且在反应过程中可能会产生有害产物 ^[33] 转谷氨酰胺酶催化 虽然反应速度快不存在美拉德反应的副产物,但酶价格昂贵 ^[34]

半固体体系^[35],一般采用直接凝胶法和间接凝胶法制备。其中,直接凝胶法是有有机凝胶剂通过结晶或自组装形成三维网络结构包裹液体油从而制成凝胶。间接凝胶法利用蛋白质、多糖的聚合物,如黄原胶和羟丙基甲基纤维素^[36]、大豆蛋白和κ-卡拉胶等在含水溶剂中形成网络捕获液体油^[37],

从而使油凝胶化,通常包括乳液模板法、泡沫模板法和溶剂交换法(图 2 中 A 区域)。需要注意的是,使用此方法在去除含水溶剂时应仍维持凝胶网络^[35]。

乳液凝胶是具有凝胶网络结构和固体状质构特性的乳液,其一般分为乳状液滴填充型凝胶和

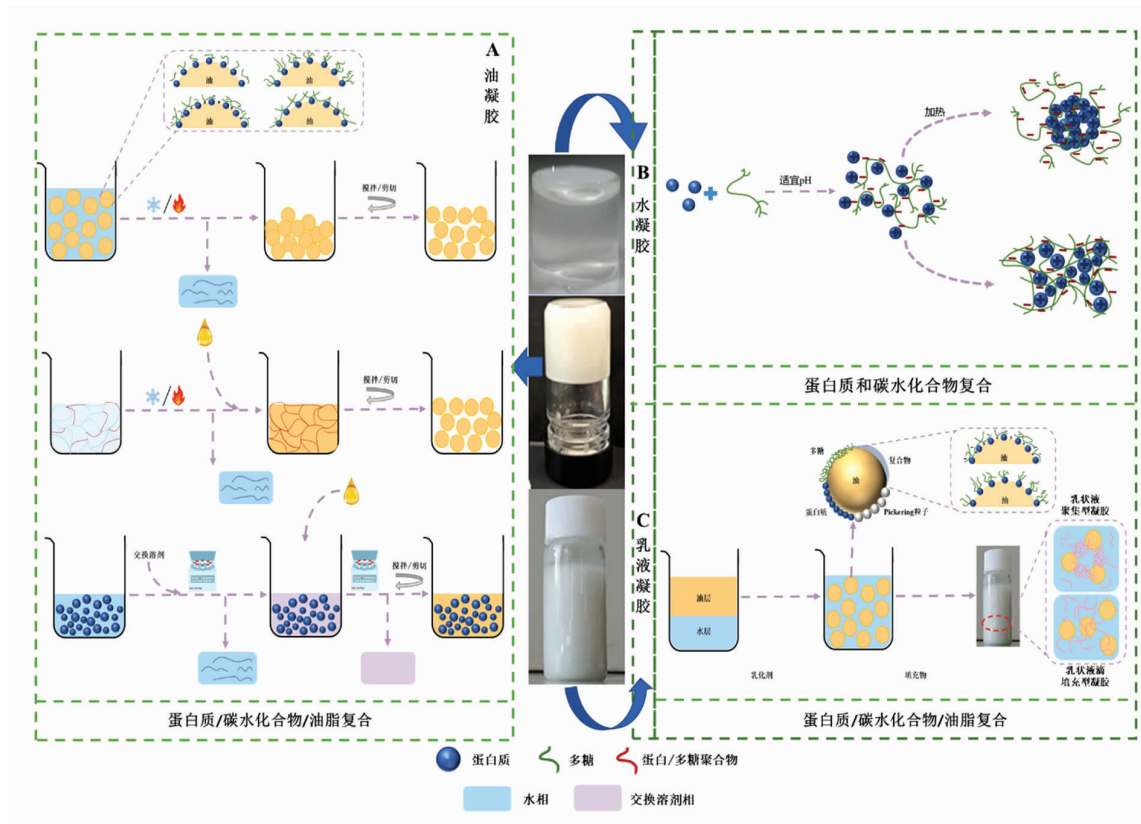


图 2 复合脂肪模拟物的制备方法^[45]

Fig.2 Preparation method of composite fat simulants^[45]

乳状液聚集型凝胶^[38]。在乳状液聚集性凝胶中,油滴通过聚集颗粒集合形成连续的三维网络结构。乳液凝胶的制备通常包括制备乳液和将乳液转化为凝胶 2 个步骤。首先,制备乳液通常加入蛋白质及其聚集体、多糖、蛋白质-多糖复合物等乳化剂避免乳液出现不稳定机制。其中蛋白质和多糖经常一起使用,二者通过共价相互作用或非共价作用连接后覆盖在液滴表面^[39],或者二者通过静电相互作用、氢键和疏水相互作用非共价键制备成胶体纳米颗粒形成稳定的 Pickering 乳液^[40](图 2 中 C 区域)。其次,针对不同的原料通过热处理、酶交联和添加离子等处理将乳液转化为固体状凝胶^[38]。其中最常用的方法是热处理,加热使蛋白质充分变性膨胀,疏水基团和羟基暴露,然后通过疏水相互作用和氢键形成网络凝胶结构^[41]。复合脂肪替代物的功能特性并不是各组成原料的简单累加,而是存在多个原料间协同或者拮抗的作用^[42-44]。因此,研究复合替代物原料的选择、复配比例和复合机制等将成为确保脂肪模拟物模拟脂肪发挥最佳效果的关键,同时为脂肪替代物在食品中的应用提供更多的可能性。

2 脂肪替代物在乳制品中的应用

乳制品可以根据其组织状态主要分为液体乳、半固体和固体产品。液体乳制品一般包括纯鲜奶和酸奶等;半固体乳制品一般包括炼乳、奶油等;固体产品乳制品一般包括黄油和奶酪等产品。

2.1 脂肪替代物在液体乳中应用

根据国际乳业联合会(IDF)的定义,液体乳包括巴氏杀菌乳、灭菌乳和酸乳 3 类。由于减少脂肪会导致酸奶微观结构孔隙变大、黏度和硬度降低,并出现乳清析出等问题,因此研究脂肪替代物在酸奶中的应用愈来愈多^[46-50]。在低脂酸奶生产的过程中,不同的原料脂肪替代物通常具有不同的脂肪替代功能。阴离子多糖如果胶、羟甲基纤维素等作为脂肪模拟物可以减少乳清析出和稳定酪蛋白胶束,因为在适宜 pH 值下,它们通过静电相互作用吸附在带阳离子的酪蛋白胶束表面,通过改变空间位阻和增强分子间空间斥力,从而防止酪蛋白胶束发生聚集^[51-52]。同时果胶还可以使凝胶网络截留住更多水分。中性多糖主要通过增加连续相



图 3 脂肪替代物在乳制品中的应用

Fig.3 Application of fat replacers in dairy products

的黏度提高酸奶凝胶网络结构的稳定性,如瓜尔豆胶等。有研究表明将瓜尔豆胶加入酸奶中,酸奶的微观结构更加有序、致密,且网络孔隙大小随着其浓度增加而减小^[16]。改性蛋白、乳液凝胶微粒等可以作为蛋白质基脂肪模拟物,它们作为活性填料与连续凝胶基质中的蛋白连接,从而使制备的低脂酸奶网络结构更加致密,低脂酸奶的弹性、黏度即流变性能也得到提高^[53]。乳清蛋白浓缩物、微粒化乳清蛋白和改性木薯淀粉 3 种脂肪替代物单独使用和混合使用对低脂酸奶会产生一定的影响,同时含有上述 3 种脂肪替代物混合物的试验组酸奶具有与全脂酸奶更加相似的质构特性^[54]。多糖和蛋白质复合制备的脂肪替代品,如制备核壳微粒、非共价混合物等,可以较好地提高低脂酸奶的质量,以热诱导 β -乳球蛋白聚集体和羧甲基纤维素为原料制备的核壳微颗粒(CSM)已成功应用于低脂酸奶中,含有 CSM 的低脂酸奶的弹性模量与商业酸奶相似^[55]。

2.2 脂肪替代物在半固体乳制品中应用

半固体的乳制品比液体乳的含水量较低,一般具有更黏稠的组织状态。人造奶油的发展已经有较长的历史,由于其价格低、产量大,在食品加工生产中能够广泛替代天然奶油。近年来,随着人们健康意识的提高,人造奶油中存在较高含量的

胆固醇和高饱和脂肪备受关注。果胶在人造奶油中是一种比较好的碳水化合物基脂肪替代物,当其替代量为 10% 时加入到人造奶油样品中,此时人造奶油具有较好的流变学性质、质构特性和微观结构等特性,因为此时人造奶油晶型为 β' 晶型,使其能够在油脂周围形成网状结晶结构,并将油脂包住,从而带来光滑细腻的口感^[56-57]。蛋白质脂肪模拟物主要在油水界面起作用,将大豆蛋白和豌豆蛋白的脂肪模拟物应用到植脂奶油中,发现由于蛋白质分子质量和空间位阻增加,其在油水界面的混合膜增厚,从而增加奶油界面的黏弹性,同时一定程度上提高奶油的起泡性和泡沫稳定性,并获得良好的感官^[58]。有研究表明以精炼大豆油为基料油,加入复合的 β -谷甾醇和卵磷脂,能够成功制备凝胶油基人造奶油,因为结晶的 β -谷甾醇和卵磷脂通过自组装的结合方式与大豆油一同构成三维网络结构,油-水两相被其网状结构牢牢的固定,从而形成均匀稳定体系,相较于普通奶油,低脂奶油的所含的乳脂和卡路里减少,且起泡性和乳化性等理化特性得到提高^[59]。

2.3 脂肪替代物在固体乳制品中应用

脂肪模拟物在乳制品中应用的研究集中在固

态乳制品上,尤其是黄油、冰淇淋以及奶酪。在冰淇淋中加入脂肪替代物是比较常见的,一般研究会脂肪替代物对其体积、流变特性和抗融性等性质的影响,如表 2 所示。研究表明,改性淀粉、菊粉和纳米纤维素等多糖已被用作冰淇淋中的脂肪替代品,它们可以降低减少脂肪引起的冰淇淋的抗融化性、流变特性和感官等缺陷^[60-61]。加入抗性淀粉和麦芽糊精、木薯糊精和改性淀粉的冰淇淋的融化速度降低,可能是因为它们会与水分之间形成氢键,增加了冰淇淋的黏度,从而增加其耐融化性^[62-63]。其中,单一的脂肪替代物不能具有脂肪所需的所有功能特性,因此一般使用复合脂肪替代物制备性质较为良好的低脂冰淇淋。大豆分离蛋白(SPI)和纳米纤维素(BC)制备的复合脂肪替代物、大豆蛋白水解物(SPH)和黄原胶(XG)以及卡拉胶和乳分离蛋白的共价复合物均可以降低低脂冰淇淋的融化速度,其中共价结合的卡拉胶和乳分离蛋白复合脂肪替代物可能是由于牛奶分离蛋白分子结构引入了亲水的多糖,抑制了水分逸散,同时共聚复合物中乳分离蛋白可以形成一定三维网络结构,对水分有截留作用。由于冰淇淋的持水性的提高,其抗融化性得以增强。

表 2 脂肪替代物在乳制品中应用

Table 2 Application of fat replacers in dairy products

脂肪替代物类型	原料	作用机理	替代效果	参考文献
多糖	西柚皮纳米纤维素(GNFC)	持水性好的 GNFC 与冰淇淋中的水分子或其它分子(蛋白质等)通过氢键结合形成三维网络结构	冰淇淋硬度和黏度有所增大,具有更好的抗融化性和质地,其中 0.4% 的添加量具有最好感官评分	[60]
多糖	菊粉	菊粉由于具有优异的保水性和持水性,可与冰淇淋中的水分相互作用降低游离水含量,减少冰晶的形成	适量的菊粉会使冰淇淋硬度和黏度稍增大,抗融化性提高	[61]
多糖	β -葡聚糖	β -葡聚糖能够结合水形成黏性溶液,水分作为增塑剂	为奶油奶酪提供了相对较高的含水率、硬度和黏附性	[64]
多糖	甘薯变性淀粉	改性的甘薯淀粉与水间形成氢键,与水结合减少了冰晶的形成,提供冰淇淋光滑质地	在低脂冰淇淋(MFIC 和 LFIC)中添加 2% 的脂肪替代品,降低了产品的膨胀率和抗融化性	[65]
蛋白质	微颗粒乳清蛋白(MWP)	MWP 根据“滚珠轴承”滚动机制,在受到力作用时减少摩擦,同时由于高持水性增加水分含量,以此模拟脂肪的润滑	MWP 的加入有效降低了食品的摩擦系数,得到了质地较软的奶酪	[66],[67]
蛋白质	改性豌豆蛋白、大豆蛋白	改性后的大豆蛋白和豌豆蛋白乳化性和起泡性提高,同时疏水基团暴露,蛋白胶体间产生交互作用,且能够吸附足够多的聚集脂肪球	增加了低脂植脂奶油中界面膜的黏弹性,提高了泡沫稳定性,具有较好的感官特性	[58]

(续表 2)

脂肪替代物类型	原料	作用机理	替代效果	参考文献
蛋白质-多糖复合	SPI-BC	BC 通过氢键和范德华力与 SPI 相互作用,附着在蛋白质网络结构上,形成更紧凑的三维网络结构,具有奶油类似质地和良好乳化性	在冰淇淋中添加 20% 的 1:20 的纳米 BC/SP 复合物,得到预期的抗融化性好、质地良好的冰淇淋	[68]
蛋白质-多糖复合	MSPH-XG	热剪切处理(微颗粒化)法制备 MSPH/XG 作为脂肪替代品,其中 MSPH 的乳化和发泡能力得到提高,XG 加入显著提高 MSPH 的发泡稳定性,从而二者复合模拟冰淇淋的脂肪润滑口感	以复配比为 92:8 的 MSPH4-XG 为脂肪替代品,冷冻时间为 21.25 min 制备的低脂冰淇淋具有较好的融化性能和最接近全脂冰淇淋的感官特征	[69]
蛋白质-多糖复合	κ -卡拉胶和 MPI	由于 MPI 的高表面活性,与 MPI 结合的卡拉胶分子可以吸附在乳脂滴表面并形成厚层,从而阻碍乳脂滴的位阻排斥絮凝	改善了冰淇淋的熔融性能和稳定性	[70]
乳状凝胶	热变性乳清蛋白-乳脂乳凝胶微粒(WPI-EGs)	WPI-EGs 中的热变性乳清蛋白可以通过氢键、疏水相互作用和二硫键与酪蛋白结合,促进酸奶中形成更致密的凝胶网络结构	改善了低脂酸奶的持水能力、质地特性和感官品质	[71]

3 结论与展望

由于消费者对于乳制品的健康需求不断提升,奶酪这一固态乳制品因丰富的营养物质而逐渐成为中国乳制品的新宠,我国奶酪的市场前景巨大,研发能够替代奶酪的高脂肪的脂肪代替物将具有很大的前景。脂肪代替物虽在乳制品中的应用也越来越广泛,但同时也存在着挑战。首先,我国较外国对于脂肪代替物的起步较晚,目前对于乳制品中脂肪代替物的研究主要集中在黄油产品中,并且多为单一的脂肪代替物,其模拟脂肪的特性还不全面。未来需要关注除黄油外的乳制品,尤其是奶酪的脂肪代替物的研究。其次,针对不同乳制品中脂肪的特性需要开发相应的脂肪代替物,因此具有不同特点的多种类型的脂肪代替物的选择和制备是一个较为复杂的过程。此外,脂肪代替物的加入可能会导致乳制品的品质降低,需要大量的试验寻找最佳添加量和制备技术。应发展更多绿色脂肪代替物原料和创造更优的加工制备技术,在保证低脂产品的品质同时降低成本,使其能够进行工业化生产,并走向市场。

参 考 文 献

- [1] 许秀丽,姚桂红,聂雪梅,等. 中外乳及乳制品法规与主要检测指标的比较分析[J]. 食品科学, 2021, 42(11): 304-312.
XU X L, YAO G H, NIE X M, et al. Comparative analysis of regulations and standards for milk and dairy products in China and abroad with respect to main quality indices[J]. Food Science, 2021, 42(11): 304-312.
- [2] YUZBASHIAN E, FERNANDO D N, PAKSERESHT M, et al. Dairy product consumption and risk of non-alcoholic fatty liver disease: A systematic review and meta-analysis of observational studies[J]. Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases, 2023, 33(8): 1461-1471.
- [3] MOHAMMAD Y, SEID M J. Recent advances in application of different hydrocolloids in dairy products to improve their techno-functional properties[J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 88(2): 468-483.
- [4] 杨晓晶. 未来 10 年, 中国奶业市场这样发展[N]. 中国食品报, 2023-05-16(4).
YANG X J. In the next 10 years, the Chinese dairy

- industry market will develop in this way[N]. *China Food News*, 2023-05-16(4).
- [5] BÄCKHED F, MANCHESTER J K, SEMENKOVICH C F, et al. Mechanisms underlying the resistance to diet-induced obesity in germ-free mice[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(3): 979-984.
- [6] HABIB Y, MOHAMMAD T M, AMIRHOSSEIN S. Crocin potentiates antioxidant defense system and improves oxidative damage in liver tissue in diabetic rats[J]. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 2018, 98: 333-337.
- [7] ZHANG Y, ZHUANG P, WU F, et al. Cooking oil/fat consumption and deaths from cardiometabolic diseases and other causes: Prospective analysis of 521, 120 individuals[J]. *BMC Med*, 2021, 19(1): 92.
- [8] XIONG J, DENG I, KELLINY S, et al. Long term high fat diet induces metabolic disorders and aggravates behavioral disorders and cognitive deficits in MAPT P301L transgenic mice [J]. *Metabolic Brain Disease*, 2022, 37(6): 1941-1957.
- [9] LICHTENSTEIN A H. Summary of American Heart Association diet and lifestyle recommendations revision 2006[J]. *Arteriosclerosis, Thrombosis, and Vascular Biology*, 2006, 26(10): 2186-2191.
- [10] SNETSELAAR G L, DE JESUS M J, DESILVA M D, et al. Dietary guidelines for Americans, 2020-2025: Understanding the scientific process, guidelines, and key recommendations[J]. *Nutrition Today*, 2021, 56(6): 287-295.
- [11] MORELL P, HERNANDO I, LLORCA E, et al. Yogurts with an increased protein content and physically modified starch: Rheological, structural, oral digestion and sensory properties related to enhanced satiating capacity [J]. *Food Research International*, 2015, 70: 64-73.
- [12] 尹衍霖. 大豆油体富集物在固体脂肪替代物中的应用[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022.
- YIN Y L. The application of soybean oil body concentrate in solid fat substitute[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2022.
- [13] WEN P C, ZHU Y L, LUO J, et al. Effect of anthocyanin -absorbed whey protein microgels on physicochemical and textural properties of reduced-fat Cheddar cheese [J]. *Journal of Dairy Science*, 2021, 104(1): 228-242.
- [14] GUAN T, LIU B, WANG R, et al. The enhanced fatty acids flavor release for low-fat cheeses by carrier immobilized lipases on O/W Pickering emulsions [J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 116: 106651.
- [15] 陈欢, 曹婷, 唐清苗, 等. 基于碳水化合物低热量脂肪模拟物研究进展[J]. *中国粮油学报*, 2021, 36(11): 187-195.
- CHEN H, CAO T, TANG Q M. Progress of the research on carbohydrate-based low-calorie fat substitutes[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2021, 36(11): 187-195.
- [16] MARY P R, MUTTURI S, KAPOOR M. Non-enzymatically hydrolyzed guar gum and orange peel fibre together stabilize the low-fat, set-type yogurt: A techno-functional study[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 122: 107100.
- [17] ARAB M, YOUSEFI M, KHANNIRI E, et al. A comprehensive review on yogurt syneresis: Effect of processing conditions and added additives[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2023, 60: 1656-1665.
- [18] KHANAL B K S, BANSAL N. Dairy fat products and functionality: Fundamental science and technology[M]. Cham: Springer International Publishing, 2020: 549-581.
- [19] 赵锦妆, 周梦舟, 徐群英. 脂肪替代物在食品中的研究进展[J]. *中国油脂*, 2017, 42(11): 157-160.
- ZHAO J Z, ZHOU M Z, XU Q Y. Progress in fat substitutes used in food [J]. *China Oils and Fats*, 2017, 42(11): 157-160.
- [20] 许朵霞. 脂肪替代物及其制备新技术[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2020: 33-34.
- XU D X. Fat substitutes and new preparation technologies[M]. Xi'an: Shanxi Science and Technology Press, 2020: 33-34.
- [21] MA Z, BOYE J I. Advances in the design and production of reduced-fat and reduced-cholesterol salad dressing and mayonnaise: A review[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2013, 6(3): 648-670.
- [22] 姚舒婷, 智慧, 沈欣怡, 等. 脂肪替代品在烘焙行业中的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(6): 285-291.
- YAO S T, ZHI H, SHEN X Y, et al. Research progress of fat substitutes in baking industry[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2020, 46(6): 285-291.

- [23] SHALTOUT O E, YOUSSEF M M, SHALTOUT E. Fat replacers and their applications in food products: A review[J]. *Food Science and Technology*, 2007, 4(1): 29–44.
- [24] SHAHEEN S, KAMAL M, ZHAO C, et al. Fat substitutes and low-calorie fats: A compile of their chemical, nutritional, metabolic and functional properties[J]. *Food Reviews International*, 2022, 98: 1–27.
- [25] 张桢玉. 大麦 β -葡聚糖复合小麦蛋白脂肪替代物的制备及应用研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.
ZHANG Z Y. Preparation and application of a fat replacer compounding barley β -glucan with wheat protein[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [26] YASHINI M, SUNIL C K, SAHANA S, et al. Protein-based fat replacers – A review of recent advances [J]. *Food Reviews International*, 2021, 37 (2): 197–223.
- [27] ORTHOEFER F T, MCCASKILL D R, COOPER D S. Rice based fat replacers[J]. *Food Technology Europe*, 1995, 2(3): 40–36.
- [28] GLUECK C J, STREICHER P A, ILLIG E K, et al. Dietary fat substitutes [J]. *Nutrition Research*, 1994, 14(10): 1605–1619.
- [29] 吴政, 闫清泉, 司阔林, 等. 菊粉在干酪中的应用现状及展望[J]. *食品工业*, 2022, 43(10): 235–238.
WU Z, YAN Q Q, SI K L, et al. Applications and prospects of inulin in cheese[J]. *The Food Industry*, 2022, 43(10): 235–238.
- [30] LUCCA P A, TEPPER B J. Fat replacers and the functionality of fat in foods[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1994, 5(1): 12–19.
- [31] 王强, 周雅琳, 赵欣, 等. 脂肪替代品在低脂肉制品中的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2013, 34(12): 347–352.
WANG Q, ZHOU Y L, ZHAO X, et al. Research progress in fat replacement of low fat meat production[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2013, 34(12): 347–352.
- [32] 陈国颂, 姚萍, 陈道勇. 非共价键胶束方法与原理的拓展与应用[J]. *高分子学报*, 2018, 68(8): 1048–1065.
CHEN G S, YAO P, CHEN D Y. Further expansions and applications of the principles and methodology of non-covalent connected micelles[J]. *Acta Polymerica Sinica*, 2018, 68(8): 1048–1065.
- [33] 冯思瑞. 多糖复合和糖基化改性对大豆分离蛋白的结构、物化特性及乳化功能的影响[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2022.
FENG S R. Effect of polysaccharide complexation and glycation modification on the structure, physical and chemical properties and emulsification function of soybean isolate protein[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2022.
- [34] 宋春丽, 赵新淮. 食品蛋白质的糖基化反应: 美拉德反应或转谷氨酰胺酶途径[J]. *食品科学*, 2013, 34(9): 369–374.
SONG C L, ZHAO X H. A review on the glycosylation of food proteins by Maillard reaction or transglutaminase-catalyzed reaction [J]. *Food Science*, 2013, 34(9): 369–374.
- [35] SUN C C, LIU R, LIANG B, et al. Microparticulated whey protein-pectin complex: A texture-controllable gel for low-fat mayonnaise[J]. *Food Research International*, 2018, 108: 151–160.
- [36] WANG S N, YANG J J, SHAO G Q, et al. pH-induced conformational changes and interfacial dilatational rheology of soy protein isolated/soy hull polysaccharide complex and its effects on emulsion stabilization [J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 109: 106075.
- [37] MARTINS ARTUR J, VICENTE ANTÓNIO A, CUNHA ROSIANE L, et al. Edible oleogels: An opportunity for fat replacement in foods[J]. *Food & Function*, 2018, 9(2): 758–773.
- [38] DEMIRKESEN I, MERT B. Recent developments of oleogel utilizations in bakery products [J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2020, 60 (14): 2460–2479.
- [39] MENG Z, QI K Y, GUO Y, et al. Macro-micro structure characterization and molecular properties of emulsion-templated polysaccharide oleogels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 7: 17–29.
- [40] TAVERNIER I, PATEL A R, VAN DER MEEREN P, et al. Emulsion-templated liquid oil structuring with soy protein and soy protein: κ -Carrageenan complexes[J]. *Food hydrocolloids*, 2017, 65: 107–120.
- [41] LIN D Q, KELLY A L, MIAO S. Preparation, structure-property relationships and applications of different emulsion gels: Bulk emulsion gels, emulsion gel particles, and fluid emulsion gels[J]. *Trends*

- in Food Science & Technology, 2020, 102: 123–137.
- [42] DICKINSON E. Interfacial structure and stability of food emulsions as affected by protein–polysaccharide interactions[J]. *Soft Matter*, 2008, 4(5): 932–942.
- [43] ZHANG X Z, WU Y H, LI Y, et al. Effects of the interaction between bacterial cellulose and soy protein isolate on the oil–water interface on the digestion of the Pickering emulsions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 126: 107480.
- [44] 廖安. 复合蛋白粉功能特性的研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
- LIAO A. Study on functional properties of mixed proteins[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2013.
- [45] GUO J X, CUI L J, MENG Z. Oleogels/emulsion gels as novel saturated fat replacers in meat products: A review[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 137: 108313.
- [46] MENSINK R P, EBBING S, LINDHOUT M, et al. Effects of plant stanol esters supplied in low-fat yoghurt on serum lipids and lipoproteins, non-cholesterol sterols and fat soluble antioxidant concentrations[J]. *Atherosclerosis*, 2002, 160(1): 205.
- [47] GUVEN M, YASAR K, KARACA O B, et al. The effect of inulin as a fat replacer on the quality of set-type low-fat yogurt manufacture[J]. *International Journal of Dairy Technology*, 2005, 58(3): 180–184.
- [48] DAI S H, CORKE H, NAGENDRA P S. Utilization of konjac glucomannan as a fat replacer in low-fat and skimmed yogurt[J]. *Journal of Dairy Science*, 2016, 99(9): 7063–7074.
- [49] ARAB M H, MOJTABA Y, ELHAM K, et al. A comprehensive review on yogurt syneresis: Effect of processing conditions and added additives[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2023, 60: 1–10.
- [50] YOUSEFI M, JAFARI S M. Recent advances in application of different hydrocolloids in dairy products to improve their techno-functional properties[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 88: 468–483.
- [51] TROMP R H, DE KRUIF C G, VAN EIJK M, et al. On the mechanism of stabilisation of acidified milk drinks by pectin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2004, 18(4): 565–572.
- [52] WUSIGALE LIANG L, LUO Y C. Casein and pectin: Structures, interactions, and applications[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 97: 391–403.
- [53] TORRES I C, AMIGO J M, KNUDSEN J C, et al. Rheology and microstructure of low-fat yoghurt produced with whey protein microparticles as fat replacer[J]. *International Dairy Journal*, 2018, 81: 62–71.
- [54] SANDOVAL CASTILLA O, LOBATO CALLEROS C, AGUIRRE MANDUJANO E, et al. Microstructure and texture of yogurt as influenced by fat replacers[J]. *International Dairy Journal*, 2004, 14(2): 151–159.
- [55] YONAH V, MARTINEZ J M, ALLIEVI C M, et al. Impact of fat replacement by core–shell microparticles on set type yoghurts: Study of their physicochemical, textural and microstructural properties[J]. *Current Nutrition & Food Science*, 2019, 15(1): 61–71.
- [56] 徐群英, 赵锦妆. 脂肪替代物对人造奶油物性品质的影响[J]. *食品科学*, 2020, 41(8): 52–56.
- XU Q Y, ZHAO J Z. Effect of fat substitute on physical properties of margarine[J]. *Food Science*, 2020, 41(8): 52–56.
- [57] 赵锦妆. 高酯橘皮果胶脂肪替代物的研究及应用[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019.
- ZHAO J Z. Research and application on fat substitute from high ester citrus pectin[J]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2019.
- [58] 王宇, 蒋将, 刘元法. 豌豆、大豆蛋白适度改性在低脂植脂奶油中的应用[J]. *中国油脂*, 2013, 38(5): 24–29.
- WANG Y, JIANG J, LIU Y F. Application of moderate modified pea protein and soybean protein in low-fat whipped cream[J]. *China Oils and Fats*, 2013, 38(5): 24–29.
- [59] 韩立娟, 陈浩, 刘胜. 凝胶油基人造奶油质地和流变性能[J]. *食品科学*, 2018, 39(7): 14–19.
- HAN L J, CHEN H, LIU S. Textural and rheological properties of oleogel-based margarine[J]. *Food Science*, 2018, 39(7): 14–19.
- [60] YU B, ZENG X, WANG L F, et al. Preparation of nano-fibrillated cellulose from grapefruit peel and its application as fat substitute in ice cream[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 254: 117415.
- [61] REDDY N V, IVARS O, ASNATE J M, et al. In-

- ulin as a fat replacer in pea protein vegan ice cream and its influence on textural properties and sensory attributes[J]. *Applied Food Research*, 2022, 2(1): 100066.
- [62] AZARI-ANPAR M, KHOMEIRI M, GHAFOURI-OSKUEI, et al. Response surface optimization of low-fat ice cream production by using resistant starch and maltodextrin as a fat replacing agent[J]. *Journal of Food Science & Technology*, 2017, 54(5): 1175-1183.
- [63] SURAPAT S, RUGTHAVON P. Use of modified starch as fat replacer in reduced fat coconut milk ice cream[J]. *Kasetsart Journal*, 2003, 37: 484-492.
- [64] NINGTYAS D W, BHANDARI B, BANSAL N, et al. Texture and lubrication properties of functional cream cheese: Effect of β -glucan and phytosterol[J]. *Journal of Texture Studies*, 2018, 49(1): 11-22.
- [65] SURENDRA BABU A, PARIMALAVALLI R, JAGAN MOHAN R. 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.
- [66] LIU K, TIAN Y J, STIEGER M, et al. Evidence for ball-bearing mechanism of microparticulated whey protein as fat replacer in liquid and semi-solid multi-component model food[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 52: 403-414.
- [67] STANKEY J A, LU Y, ABDALLA A, et al. Low-fat Cheddar cheese made using microparticulated whey proteins: Effect on yield and cheese quality[J]. *International Journal of Dairy Technology*, 2017, 70(4): 481-491.
- [68] 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.
- [69] 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.
- [70] SEO C W, OH N S. Functional application of Maillard conjugate derived from a κ -carrageenan/milk protein isolate mixture as a stabilizer in ice cream[J]. *LWT*, 2022, 161: 113406.
- [71] LI H, LIU T, ZOU X, et al. Utilization of thermal-denatured whey protein isolate-milk fat emulsion gel microparticles as stabilizers and fat replacers in low-fat yogurt[J]. *LWT*, 2021, 150: 112045.

The Application of Fat Substitutes in Dairy Products

Zhang Can, Yang Yang, Ma Chunmin, Xu Yue, Bian Xin, He Yinyuan, Zhang Na*
(College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028)

Abstract Dairy products, as a food with almost perfect nutritional value, are indispensable to humans. However, the high content of fat in dairy products may have adverse effects on human health. With the increasing awareness of health, people have started to consume low-fat or low-fat foods as a way of life. Therefore, fat substitutes, which can maintain the delicious taste of dairy products and related functional properties such as texture and rheological properties, and can reduce fat content, have emerged, which has a very broad market prospect. The classification and preparation of fat substitutes, the research progress of their role and application in the field of dairy products were reviewed, which provided theoretical support for the research of new dairy fat substitutes. And the research direction and prospect of fat substitutes in the dairy market were discussed.

Keywords dairy product; fat substitute; fat; research progress; preparation method