

新型脂肪替代物：油凝胶在食品中的应用与挑战

贾佳, 朱蒙蒙, 宋万荣, 王勇浩, 张静, 魏安池, 孙尚德, 陈小威

(河南工业大学粮油食品学院, 郑州 450001)

摘要:为促进油凝胶作为脂肪替代物的综合利用, 简要介绍了油凝胶的构建方法, 并对其在食品中的应用及面临的挑战进行了详细阐述。作为一种重要的新型脂肪替代物, 油凝胶已被广泛用于多种食品配方中, 如烘焙产品、人造奶油、肉制品、巧克力等, 以减少饱和脂肪酸和反式脂肪酸的含量, 同时提供固体质构而不改变液体油脂的化学组成和营养价值。然而, 油凝胶在实际应用中也面临一些挑战, 涉及其稳定性、成本效益以及消费者接受度等方面。未来的研究应更深入探讨油凝胶的理化性质和功能特性对食品应用的影响, 充分发挥油凝胶作为健康脂肪替代物的潜力。

关键词:油凝胶; 脂肪替代物; 食品应用; 凝胶剂

中图分类号: TS252.7; TS201.2 文献标识码: A 文章编号: 1003-7969(2025)03-0124-08

New fat substitutes: applications and challenges of oleogels

JIA Jia, ZHU Mengmeng, SONG Wanrong, WANG Yonghao, ZHANG Jing,
WEI Anchi, SUN Shangde, CHEN Xiaowei

(College of Food Science and Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: In order to promote the comprehensive utilization of oleogels as fat substitutes, the construction method of oleogels was briefly described, and their applications and challenges in food products were elaborated. As an important new type of fat substitutes, oleogels have been widely used in a variety of food formulations, such as bakery products, margarines, meat products, chocolates, etc., so as to reduce the content of saturated fatty acids and *trans* fatty acids while provide a solid texture without altering the chemical composition and nutritional value of the liquid oils. However, oleogels face some challenges in practical applications regarding their stability, cost-effectiveness, and consumer acceptance. Future studies should explore in greater depth the impact of the physicochemical and functional properties of oleogels on food applications to fully realize the potential of oleogels as healthy fat substitutes.

Key words: oleogels; fat substitutes; food application; oleogelators

固体脂肪在食品加工中发挥着重要作用, 可赋予食品特殊的风味、口感、质构等, 被广泛应用于烘焙产品、巧克力、糖果、涂抹酱等食品的生产加工中。目前, 固体脂肪主要来源于动物脂肪、分提棕榈油或部分氢化植物油(不完全氢化油)等, 其含有大量饱和脂肪酸或反式脂肪酸。研究表明, 过量摄入饱和

脂肪酸和反式脂肪酸会对人体产生不利影响, 如增加肥胖、心脑血管疾病、2型糖尿病和高血压等疾病的诱发风险^[1-2]。因此, 许多国家和地区相继出台了有关控制食品中饱和脂肪酸和反式脂肪酸的建议及法律法规, 以达到健康膳食的目的^[3]。随着部分氢化油和高饱和油脂的限制使用以及消费者对油脂健康的关注和购买意向的变化, 亟须开发可以替代传统固体脂肪的“低饱和”“零反式”新型油脂产品。

油凝胶(Oleogels)是在凝胶剂的作用下将液体油脂(通常为高不饱和油脂)凝胶化的新型脂肪替代物, 能够在不改变其脂肪酸组成和高效保留其营养物质下, 赋予食品良好的口感与质地, 具有替代传统固体脂肪的潜力。本文综述了油凝胶的形成机制,

收稿日期: 2023-10-30; 修回日期: 2024-11-06

基金项目: 河南省高校科技创新人才支持计划(24HASTIT056); 河南省自然科学基金面上项目(232300420017)

作者简介: 贾佳(1999), 女, 硕士研究生, 研究方向为油脂加工与品质控制(E-mail) jiajiatlp@163.com。

通信作者: 魏安池, 副教授, 博士(E-mail) weianchigd@163.com; 陈小威, 副教授, 博士(E-mail) fexwchen@haut.edu.cn。

以及作为脂肪替代物在食品中的应用和面临的挑战,以期充分了解油凝胶作为健康脂肪替代物的潜力。

1 油凝胶的构建方法

油凝胶的构建方法可分为直接分散法和间接法。直接分散法通常使用低分子质量的凝胶剂和部分高分子质量的凝胶剂(如乙基纤维素和琼脂等),通过范德华力、氢键、分子间相互作用或共价键来稳定油凝胶^[4]。不同凝胶剂形成油凝胶的机制有差异,具体如下:①结晶颗粒。如蜡、单甘酯、脂肪酸和植物甾醇等^[5-6]凝胶剂通过形成结晶网络来阻止液体油脂的流动^[7]。②自组装。如 12-羟基硬脂酸、 γ -谷维素和 β -谷甾醇等^[8-9]凝胶剂通过形成结晶束,继而进行螺旋或扭转形成纤维状网络结构限制液体油脂的流动,使其凝胶化^[10]。③聚合物网络。在常见的聚合物凝胶剂中,乙基纤维素可以通过直接分散法构建油凝胶,在其凝胶网络形成中氢键发挥了重要作用^[11]。

构建油凝胶常用的间接法有乳液模板法、泡沫模板法和溶剂交换法等。其中对乳液模板法的研究较多,该方法通常是将凝胶剂分散在水相中,形成乳液,将乳液经烘箱干燥或冷冻干燥脱水后进行剪切,即得到稳定的油凝胶^[12]。基于乳液模板法的凝胶剂有甲基纤维素和羟丙基甲基纤维素等。泡沫模板法类似乳液模板法,该方法是通过制备的多孔泡沫吸附液体油脂,干燥后得到油凝胶。溶剂交换法通常是将凝胶剂溶解于一种溶剂中,然后通过交换溶剂来得到油凝胶。此外,还有利用气凝胶作为模板制备油凝胶的研究^[13-14]。

2 油凝胶在食品中的应用

2.1 烘焙产品

起酥油和黄油是烘焙产品中最常用的两种固体

脂肪。固体脂肪通过破坏面筋蛋白和淀粉网络的连续性,增加并稳定气泡,使得产品长期保持松软,新鲜适口^[15]。烘焙产品中使用油凝胶替代固体脂肪的研究多涉及面糊或面团的微观结构和流变特性、成品的质构和感官风味、储藏过程中油脂的迁移和氧化稳定性等。蜡基油凝胶替代传统固体脂肪应用于饼干中,可以减少饱和脂肪酸的摄入,且对饼干质地没有显著影响,如:Jang 等^[16]研究发现,使用小烛树蜡基油凝胶替代饼干配方中的起酥油,所制作的饼干中不饱和脂肪酸含量增加至 92% 左右,且具有柔软的口感;Hwang 等^[17]研究发现,原料油和天然蜡的种类对面团的硬度和延展性等性质影响不显著,制作出的饼干与普通饼干质地相似。

与饼干面团不同,面包或蛋糕的面团通常需要润滑或有稳定的气孔,以保证烘焙后产品具有良好的适口性和松软质地。蛋糕面糊是一种复杂的水包油型体系,烘焙后产品具有多孔结构、较大的体积和蓬松柔软的海绵质地^[8]。Pehlivanoglu 等^[18]通过考察蜡基油凝胶蛋糕的颜色、质地和感官特性,认为油凝胶蛋糕可以被消费者接受。Giacomozzi 等^[19]研究发现,单甘酯基油凝胶对降低蛋糕的油脂迁移率有积极作用。

在面包产品中,蜡基和聚合物基油凝胶对面团、面包质构有积极影响,能够降低烘焙损失率和面包中的饱和脂肪酸含量。孟宗等^[20]研究表明,以葵花籽油为基料油,食品级植物蜡(蜂蜡、米糠蜡、棕榈蜡)为凝胶剂构建的油凝胶,所制作的面包与对照组面包(黄油、起酥油)相比,在各项指标上无太大劣势,但烘焙损失率和饱和脂肪酸含量均降低。油凝胶在烘焙产品中的应用见表 1。

表 1 油凝胶在烘焙产品中的应用

Table 1 Application of oleogels in bakery products

烘焙产品	原料油	凝胶剂	结果	参考文献
饼干	菜籽油	小烛树蜡	替代饼干中 60% 的起酥油,显著改善了饼干的物理特性	[21]
	榛子油	蜂蜡	替代饼干中 100% 的起酥油,其质地、组成和性质与用起酥油制作的常规饼干相当	[22]
	大豆油	β -谷甾醇和单甘酯	替代饼干中的起酥油,饼干品质优于起酥油饼干	[23]
蛋糕及松饼	葵花籽油	蜂蜡	替代无麸质蛋糕中部分起酥油,其饱和脂肪酸含量降低约 35%,烘焙产品质量可接受	[24]
	葵花籽油	米糠蜡、蜂蜡和小烛树蜡	饱和脂肪酸含量显著降低至 14% ~ 17%,质量属性与起酥油蛋糕相当	[25]
	葵花籽油	羟丙基甲基纤维素	羟丙基甲基纤维素油凝胶替代 50% 的起酥油成功地制作出了质地、体积和总孔隙率与原配方相似的松饼	[26]

续表 1

烘焙产品	原料油	凝胶剂	结果	参考文献
面包	高油酸葵花籽油	单甘酯	替代人造黄油后获得具有延展性更大和比容更高的产品,和对照松饼相比,储存 10 d 后减少了约 50% 的油脂迁移	[19]
	大豆油	乙基纤维素	赋予面包面团良好的稳定性、吸湿性和持气能力	[27]
	葵花籽油	米糠蜡、蜂蜡、棕榈蜡	油凝胶制作的面包在感官评定和质构方面与对照组相比均无太大劣势,且烘焙损失率小,饱和脂肪酸含量降低	[20]
	米糠油	小烛树蜡	油凝胶替代 75% 的黄油所制作的面包的硬度与对照组相比无差异,饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸比例较对照组(2.44:1)显著降低至 0.34:1	[28]

2.2 人造奶油和涂抹脂

人造奶油是脂肪含量较高 (>80%) 的产品,而涂抹脂脂肪含量通常在 35% ~ 42%^[29]。脂肪的熔点与涂抹性相关,熔点较高会在储存过程中形成较大晶体,从而产生颗粒感。根据现有研究,蜡基油凝胶多被用于制备人造奶油和涂抹脂,制备的产品与市售人造奶油硬度相当,储存稳定,并减少了脂肪含

量,被认为是一种潜在的人造奶油基料油替代品。然而,天然蜡本身熔点较高(蜂蜡、小烛树蜡、米糠蜡、葵花籽蜡等的熔点大于 60 °C),在人造奶油配方中添加蜡基油凝胶通常会导致人造奶油的熔点高于商业人造奶油,使其口感不佳,但蜡基油凝胶的稳定性仍被认为是制备人造奶油的最佳选择。油凝胶在人造奶油中的应用见表 2。

表 2 油凝胶在人造奶油中的应用

Table 2 Application of oleogels in margarine

原料油	凝胶剂	结果	参考文献
大豆油	3%、5%、7% 小烛树蜡和蜂蜡混合物	两种蜡混合可以改善由蜡基油凝胶制备的人造黄油的硬度和熔融特性	[30]
米糠油	5% 米糠蜡	油凝胶组喂养的大鼠脂肪组织累积减少,血清和肝脏中的甘油三酯含量下降了约 30%	[31]
高油酸葵花籽油	6%、10%、14% 单甘酯	单甘酯基人造奶油硬度与商业人造奶油相似	[32]
高油酸红花籽油	乙基纤维素、单甘酯、小烛树蜡	可替代商业起酥油	[33]
大豆油	葵花籽蜡、米糠蜡、小烛树蜡	葵花籽蜡基油凝胶能形成稳定的人造奶油,硬度与市售人造奶油相当	[34]
初榨橄榄油	蜂蜡	油凝胶人造奶油在硬度和黏附性等方面与市售人造奶油相当	[35]
葵花籽油	2% 虫蜡	无额外乳化剂添加下所制备的人造奶油性质较为稳定	[36]

2.3 肉制品

油凝胶在各种肉制品(例如香肠、汉堡肉饼等)中的应用也得到了探索。脂肪决定了肉制品的结构和口感,油凝胶适当的硬度和热可逆性为其在肉制品中的应用提供了便利。汉堡肉饼含有一定量的固体脂肪,而油凝胶替代传统固体脂肪制作出的肉饼蒸煮损失率降低,可接受度良好,饱和脂肪酸含量减少,具有更高的营养价值^[37-38]。Oh 等^[39]将使用羟丙基甲基纤维素为凝胶剂,利用泡沫模板法制备的油凝胶替代肉饼中的牛油,发现肉饼的质构特性随着羟丙基甲基纤维素含量的增加而强化,羟丙基甲基纤维素油凝胶替代 50% 和 100% 牛油制作的肉饼

蒸煮损失率相比牛油肉饼显著降低。此外,使用混合植物油(橄榄油 44.39%、亚麻籽油 37.87%、鱼油 17.74%)制备的乙基纤维素基和蜂蜡基油凝胶替代固体脂肪,不仅提高了肉饼的营养价值,且两种油凝胶汉堡肉饼质地更加柔软^[40]。

香肠也是肉制品中油凝胶应用的重要研究对象。Kouzounis 等^[41]以质量比 3:1 的单甘酯与植物甾醇作为混合凝胶剂制备的葵花籽油凝胶替代法兰克福香肠中 50% 的猪肉脂肪,发现单甘酯和植物甾醇协同作用形成了较强的网络结构、硬度和凝胶强度。含有油凝胶的香肠具有与原配方香肠相似的内聚性和弹性,但是在硬度、脆度和咀嚼性等方面表现

稍差。Shao 等^[42]研究发现,乙基纤维素(6%~12%)和花生油制备的油凝胶部分替代(10%~30%)哈尔滨红肠中的猪肉脂肪,所得红肠在质构、

脂质氧化和感官特性方面与原配方红肠无显著差异,且随着油凝胶替代量的增加,哈尔滨红肠的结构更加致密,硬度增加。油凝胶在肉制品中的应用见表 3。

表 3 油凝胶在肉制品中的应用

Table 3 Application of oleogels in meat products

肉制品	原料油	凝胶剂	结果	参考文献
肉饼	芝麻油	10% 蜂蜡	替代部分牛肉饼中的固体脂肪,脂肪吸收减少,蒸煮损失降低,但烹饪收缩和脂肪氧化增加	[43]
	亚麻籽油	8% 蜂蜡	替代香肠中 50% 猪肉固体脂肪时并不影响其质地	[44]
香肠	大豆油	2.5%、10% 米糠蜡	可完全替代香肠中的猪肉脂肪	[45]
	亚麻籽油	8% 蜂蜡 + γ -谷维素 + β -谷甾醇	油凝胶对干制香肠质地和感官品质的影响显著	[46]
	葵花籽油	单甘酯	香肠结构随着油凝胶含量增加变得更加致密,当油凝胶完全替代香肠中猪肉脂肪时,香肠的硬度略有增加	[47]

2.4 巧克力、糖果、冰淇淋制品

使用不同种类的油凝胶来改善巧克力和相关产品的物理和功能特性已成为近期的研究趋势^[48]。巧克力中的可可脂作为连续相赋予巧克力网状结构以维持分散相(可可液块、糖等)的空间位置,其不仅决定了巧克力的物理性质,也赋予了巧克力一定的风味。油凝胶替代传统固体脂肪应用于巧克力产品和糖果中,其产品质构、感官特性等与普通产品类似,可接受度良好,能抑制油脂迁移,且致密的凝胶网络对巧克力的质构特性有积极影响。Sun 等^[49]以玉米油为基料油,将 β -谷甾醇与谷维素/硬脂酸/卵磷脂复配作为混合凝胶剂制备油凝胶基巧克力,结果表明, β -谷甾醇与谷维素混合制备的油凝胶具有最强的胶凝能力和最致密的凝胶结晶网络,由其制备的巧克力与普通巧克力有相似的质构、晶体结构、流变特性和感官特性。杂化凝胶是由水凝胶和油凝胶组成的双组分体系,研究表明,选择水凝胶(2%海藻酸钠分散液)与油凝胶(葡萄籽油与2%蜂蜡制备)比例为5:95为最佳配比用于替代巧克力

中的可可脂,当替代量为15%时,巧克力流变学、质构、热力学和感官评价等与对照组无明显差异,且一定程度上提高了巧克力熔点,降低了巧克力中饱和脂肪酸含量^[50]。

除巧克力外,糖果在储藏过程中也存在油脂迁移的突出问题。添加少量的油凝胶可以抑制产品的油脂迁移。Si 等^[51]研究表明,单甘酯和脱水山梨糖醇三硬脂酸酯+卵磷脂(质量比50:50)制备的大豆油凝胶在果仁糖体系中显示出的触变行为,提示油凝胶可能具有防止油脂迁移的作用,另外,由于单甘酯基油凝胶更强的网络结构,相比脱水山梨糖醇三硬脂酸酯+卵磷脂基油凝胶其具有更好的延缓油脂迁移的能力。在冰淇淋制品中,油凝胶能够改善冰淇淋的物理性质,如膨胀率、融化率和硬度。Huang 等^[52]研究表明,坚果油(花生油和核桃油)乳液凝胶制备的冰淇淋较坚果油制备的冰淇淋展现出更高的膨胀率、更低的融化率和硬度,综合指标与传统黄油冰淇淋相当,甚至在某些指标上更优。油凝胶在巧克力、糖果和冰淇淋产品中的应用见表 4。

表 4 油凝胶在巧克力、糖果和冰淇淋产品中的应用

Table 4 Application of oleogels in chocolate, candy and ice cream products

产品	原料油	凝胶剂	结果	参考文献
巧克力	玉米油	10% 的单硬脂酸甘油酯、 β -谷甾醇/卵磷脂和乙基纤维素	单硬脂酸甘油酯基油凝胶可以替代 100% 的可可脂制作巧克力,油凝胶巧克力的热性能和晶型与黑巧克力相当	[53]
	石榴籽油	5% 单硬脂酸甘油酯、蜂蜡、蜂胶蜡	替代巧克力酱中 50% 的棕榈油,影响了巧克力储存期间的硬度(蜂蜡基油凝胶巧克力硬度增加),但显示出较好的持油能力。	[7]

续表 4

产品	原料油	凝胶剂	结果	参考文献
糖果	葵花籽油	γ -谷维素 + β -谷甾醇	添加少量油凝胶在果仁糖中,减少了 50% 的油脂迁移	[54]
冰淇淋	葵花籽油	8%、12% 植物甾醇 + γ -谷维素	可完全替代冰淇淋中的固体脂肪	[55]
	椰子油、大豆油、高油酸棕榈油	乳清分离蛋白	油凝胶低脂冰淇淋与传统冰淇淋有相似的黏度和质构特性	[56]

3 油凝胶在食品中应用的挑战

目前,即使许多凝胶剂在食品中的应用已被广泛研究,但仍需寻找经济、低浓度、有效、对加工条件耐受的食品级凝胶剂。根据 GB 2760—2014《食品安全国家标准 食品添加剂使用标准》,蜂蜡可按生产需要添加在糖果和巧克力制品包衣中,而巴西棕榈蜡在巧克力和糖果制品中最大添加量为 0.6 g/kg。美国食品药品监督管理局已批准的食品添加剂中,乙基纤维素可以用作调味剂中的固定剂加入食品中。但多数凝胶剂在食品中不被允许使用,这限制了油凝胶在食品工业中的应用与发展。凝胶剂可能会导致产品品质发生变化,如蜡在结晶后性质不稳定,易受外界因素影响,进而影响食品的货架期,需要额外添加抗氧化剂维持其氧化稳定性等。纤维素衍生物、蛋白质和其他亲水性多糖等聚合物也被认为是理想的凝胶剂,但使用这些凝胶剂制备油凝胶需要额外的步骤(如高温处理、冻干、溶剂去除等),使得基于聚合物的油凝胶在大规模应用于食品方面存在一定的阻碍^[57];然而,聚合物基油凝胶出色的稳定性是不容忽视的。目前,研究已知多组分凝胶协同效应背后的机制对于进一步探索油凝胶形成,解决单一凝胶剂所产生的问题至关重要。

油凝胶替代食品配方中原有的固体脂肪后,食品的质地、风味以及货架期等会受到一定影响,如:油凝胶可能会因为剪切力而失去固体结构,在烘焙产品中完全替代起酥油会使产品孔隙率下降等;油凝胶人造奶油的研究多集中于硬度、熔点、延展性、乳液稳定性等功能特性,感官特性等与普通人造奶油还存在一定差距,实现商业化还需要一定时间;油凝胶肉制品与传统肉制品相比不饱和脂肪酸含量升高,但产品质地、感官、储藏和烹饪过程中的脂质稳定性等方面与传统肉制品还有差异,需要更深入地了解油凝胶与肉制品基质中其他关键成分的相互作用,或者混合凝胶剂产生的相互作用对肉制品的影响,提高油凝胶肉制品的氧化稳定性和感官特性。综上,相比于传统固体脂肪,油凝胶在食品中应用可降低饱和脂肪酸含量,但无法完全兼顾食品多方面

的功能和感官特性,在食品中的应用还存在缺陷。此外,在实际生产时,油凝胶的生产成本相对较高,尤其是在与更便宜的传统脂肪替代品竞争时,这可能会影响其在市场上的竞争力。因此,在选择凝胶剂时需要考虑生产成本,同时也需要发掘更多经济型凝胶剂,以降低油凝胶产品的生产成本,获得更加开阔的市场。

4 结论与展望

油凝胶在食品中的应用可以提高食品的营养特性,降低饱和脂肪酸含量,并赋予食品质构、风味和稳定性等功能特性,但油凝胶食品与传统食品相比,在感官等方面还存在一定差距。目前,应用于食品的油凝胶多使用单一凝胶剂,未来对油凝胶食品的研究应更集中于开发食品级的单组分或多组分混合凝胶剂,通过调整凝胶剂的种类和比例来优化油凝胶基食品的质构和口感,简化聚合物基油凝胶制备方法,使得蛋白质、多糖等聚合物基油凝胶得以广泛应用于食品中,匹配不同的食品加工场景,适应更多的食品品质需求,以克服现有油凝胶应用的局限性,同时可以根据需求灵活调节油凝胶的性质,进一步促进油凝胶在食品加工领域的应用,发展更加健康、安全的食品级油凝胶及相关食品产品。

参考文献:

- [1] 郭颖. 基于小分子乳化剂构建零反式、低饱和脂肪酸油凝胶的研究[D]. 江苏 无锡: 江南大学, 2019.
- [2] RESTREPO B J, RIEGER M. *Trans* fat and cardiovascular disease mortality: Evidence from bans in restaurants in New York[J]. *J Health Econ*, 2016, 45: 176–196.
- [3] STENDER S, ASTRUP A, DYERBERG J. Tracing artificial *trans* fat in popular foods in Europe: A market basket investigation [J/OL]. *BMJ Open*, 2014, 4(5): e005218 [2023-10-30]. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2014-005218>.
- [4] SUZUKI M, HANABUSA K. Polymer organogelators that make supramolecular organogels through physical cross-linking and self-assembly[J]. *Chem Soc Rev*, 2010, 39(2): 455–463.
- [5] GIACOMOZZI A, PALLA C, CARRÍN M E, et al.

- Tailoring physical properties of monoglycerides oleogels using high - intensity ultrasound[J/OL]. *Food Res Int*, 2020, 134: 109231 [2023 - 10 - 30]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109231>.
- [6] YI B, KIM M J, LEE S Y, et al. Physicochemical properties and oxidative stability of oleogels made of carnauba wax with canola oil or beeswax with grapeseed oil [J]. *Food Sci Biotechnol*, 2017, 26(1): 79 - 87.
- [7] FAYAZ G, GOLI S A H, KADIVAR M, et al. Potential application of pomegranate seed oil oleogels based on monoglycerides, beeswax and propolis wax as partial substitutes of palm oil in functional chocolate spread[J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2017, 86: 523 - 529.
- [8] DASSANAYAKE L S K, KODALI D R, UENO S. Formation of oleogels based on edible lipid materials[J]. *Curr Opin Colloid Interface Sci*, 2011, 16(5): 432 - 439.
- [9] MARTINS A J, CERQUEIRA M A, PASTRANA L M, et al. Sterol - based oleogels' characterization envisioning food applications[J]. *J Sci Food Agric*, 2019, 99(7): 3318 - 3325.
- [10] ZHAO W, WEI Z, XUE C. Recent advances on food - grade oleogels; Fabrication, application and research trends[J]. *Crit Rev Food Sci Nutr*, 2022, 62(27): 7659 - 7676.
- [11] DAVIDOVICH - PINHAS M, BARBUT S, MARANGONI A G. The role of surfactants on ethylcellulose oleogel structure and mechanical properties [J]. *Carbohydr Polym*, 2015, 127: 355 - 362.
- [12] ESPERT M, SALVADOR A, SANZ T. Cellulose ether oleogels obtained by emulsion - templated approach without additional thickeners[J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2020, 109: 106085 [2023 - 10 - 30]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2020.106085>.
- [13] PLAZZOTTA S, CALLIGARIS S, MANZOCCO L. Structural characterization of oleogels from whey protein aerogel particles [J/OL]. *Food Res Int*, 2020, 132: 109099 [2023 - 10 - 30]. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109099>.
- [14] CHEN K, ZHANG H. Fabrication of oleogels via a facile method by oil absorption in the aerogel templates of protein - polysaccharide conjugates[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12(6): 7795 - 7804.
- [15] PATEL A R, DEWETTINCK K. Edible oil structuring: An overview and recent updates[J]. *Food Funct*, 2016, 7(1): 20 - 29.
- [16] JANG A, BAE W, HWANG H S, et al. Evaluation of canola oil oleogels with candelilla wax as an alternative to shortening in baked goods[J]. *Food Chem*, 2015, 187: 525 - 529.
- [17] HWANG H S, SINGH M, LEE S. Properties of cookies made with natural wax - vegetable oil organogels[J]. *J Food Sci*, 2016, 81(5): C1045 - C1054.
- [18] PEHLIVANOGLU H, OZULKU G, YILDIRIM R M, et al. Investigating the usage of unsaturated fatty acid - rich and low - calorie oleogels as a shortening mimetics in cake [J/OL]. *J Food Process Preserv*, 2018, 42(6): e13621 [2023 - 10 - 30]. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13621>.
- [19] GIACOMOZZI A S, CARRÍN M E, PALLA C A. Muffins elaborated with optimized monoglycerides oleogels: From solid fat replacer obtention to product quality evaluation [J]. *J Food Sci*, 2018, 83(6): 1505 - 1515.
- [20] 孟宗, 张梦蕾, 刘元法. 葵花籽油基油凝胶在面包及冰淇淋产品中的应用研究[J]. *中国油脂*, 2019, 44(12): 154 - 160.
- [21] MERT B, DEMIRKESEN I. Reducing saturated fat with oleogel/shortening blends in a baked product[J]. *Food Chem*, 2016, 199: 809 - 816.
- [22] YILMAZ E, ÖĞÜTCÜ M. The texture, sensory properties and stability of cookies prepared with wax oleogels[J]. *Food Funct*, 2015, 6(4): 1194 - 1204.
- [23] ZHAO M, LAN Y, CUI L, et al. Physical properties and cookie - making performance of oleogels prepared with crude and refined soybean oil; A comparative study[J]. *Food Funct*, 2020, 11(3): 2498 - 2508.
- [24] DEMIRKESEN I, MERT B. Utilization of beeswax oleogel - shortening mixtures in gluten - free bakery products[J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2019, 96(5): 545 - 554.
- [25] OH I K, AMOAH C, LIM J, et al. Assessing the effectiveness of wax - based sunflower oil oleogels in cakes as a shortening replacer[J]. *LWT - Food Sci Technol*, 2017, 86: 430 - 437.
- [26] OH I K, LEE S. Utilization of foam structured hydroxypropyl methylcellulose for oleogels and their application as a solid fat replacer in muffins[J]. *Food Hydrocolloid*, 2018, 77: 796 - 802.
- [27] YE X, LI P, LO Y M, et al. Development of novel shortenings structured by ethylcellulose oleogels [J]. *J Food Sci*, 2019, 84(6): 1456 - 1464.
- [28] JUNG D, OH I, LEE J, et al. Utilization of butter and oleogel blends in sweet pan bread for saturated fat reduction; Dough rheology and baking performance [J/OL]. *LWT - Food Sci Technol*, 2020, 125: 109194 [2023 - 10 - 30]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109194>.
- [29] PUŞÇAŞ A, MUREŞAN V, SOCACIU C, et al. Oleogels in food: A review of current and potential applications[J/OL]. *Foods*, 2020, 9(1): 70 [2023 - 10 - 30]. <https://doi.org/10.3390/foods9010070>.

- [30] HWANG H S, WINKLER – MOSER J K. Properties of margarines prepared from soybean oil oleogels with mixtures of candelilla wax and beeswax[J]. *J Food Sci*, 2020, 85(10): 3293 – 3302.
- [31] LIMPIMWONG W, KUMRUNGSEE T, KATO N, et al. Rice bran wax oleogel: A potential margarine replacement and its digestibility effect in rats fed a high – fat diet[J]. *J Funct Foods*, 2017, 39: 250 – 256.
- [32] PALLA C, GIACOMOZZI A, GENOVESE D B, et al. Multi – objective optimization of high oleic sunflower oil and monoglycerides oleogels: Searching for rheological and textural properties similar to margarine [J]. *Food Struct*, 2017, 12: 1 – 14.
- [33] RODRÍGUEZ – HERNÁNDEZ A K, PÉREZ – MARTÍNEZ J D, GALLEGOS – INFANTE J A, et al. Rheological properties of ethyl cellulose – monoglyceride – candelilla wax oleogel vis – a – vis edible shortenings[J/OL]. *Carbohydr Polym*, 2021, 252: 117171 [2023 – 10 – 30]. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117171>.
- [34] HWANG H S, SINGH M, BAKOTA E L, et al. Margarine from organogels of plant wax and soybean oil [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2013, 90(11): 1705 – 1712.
- [35] ÖĞÜTCÜ M, ARIFOĞLU N, YILMAZ E. Preparation and characterization of virgin olive oil – beeswax oleogel emulsion products [J]. *J Am Oil Chem Soc*, 2015, 92(4): 459 – 471.
- [36] PATEL A R, RAJARETHINEM P S, GRĘDOWSKA A, et al. Edible applications of shellac oleogels: Spreads, chocolate paste and cakes [J]. *Food Funct*, 2014, 5(4): 645 – 652.
- [37] HECK R T, LUCAS B N, SANTOS D J P D, et al. Oxidative stability of burgers containing chia oil microparticles enriched with rosemary by green – extraction techniques [J]. *Meat Sci*, 2018, 146: 147 – 153.
- [38] LÓPEZ – PEDROUSO M, LORENZO J M, GULLÓN B, et al. Novel strategy for developing healthy meat products replacing saturated fat with oleogels [J]. *Curr Opin Food Sci*, 2021, 40: 40 – 45.
- [39] OH I, LEE J, LEE H G, et al. Feasibility of hydroxypropyl methylcellulose oleogel as an animal fat replacer for meat patties [J]. *Food Res Int*, 2019, 122: 566 – 572.
- [40] GÓMEZ – ESTACA J, PINTADO T, JIMÉNEZ – COLMENERO F, et al. The effect of household storage and cooking practices on quality attributes of pork burgers formulated with PUFA – and curcumin – loaded oleogels as healthy fat substitutes [J/OL]. *LWT – Food Sci Technol*, 2020, 119: 108909 [2023 – 10 – 30]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2019.108909>.
- [41] KOUZOUNIS D, LAZARIDOU A, KATSANIDIS E. Partial replacement of animal fat by oleogels structured with monoglycerides and phytosterols in frankfurter sausages [J]. *Meat Sci*, 2017, 130: 38 – 46.
- [42] SHAO L, BI J, LI X, et al. Effects of vegetable oil and ethylcellulose on the oleogel properties and its application in Harbin red sausage [J/OL]. *Int J Biol Macromol*, 2023, 239: 124299 [2023 – 10 – 30]. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124299>.
- [43] MOGHATADEI M, SOLTANIZADEH N, GOLI S A H. Production of sesame oil oleogels based on beeswax and application as partial substitutes of animal fat in beef burger [J]. *Food Res Int*, 2018, 108: 368 – 377.
- [44] FRANCO D, MARTINS A J, LÓPEZ – PEDROUSO M, et al. Strategy towards replacing pork backfat with a linseed oleogel in frankfurter sausages and its evaluation on physicochemical, nutritional, and sensory characteristics [J/OL]. *Foods*, 2019, 8(9): 366 [2023 – 10 – 30]. <https://doi.org/10.3390/foods8090366>.
- [45] WOLFER T L, ACEVEDO N C, PRUSA K J, et al. Replacement of pork fat in frankfurter – type sausages by soybean oil oleogels structured with rice bran wax [J]. *Meat Sci*, 2018, 145: 352 – 362.
- [46] FRANCO D, MARTINS A J, LÓPEZ – PEDROUSO M, et al. Evaluation of linseed oil oleogels to partially replace pork backfat in fermented sausages [J]. *J Sci Food Agric*, 2020, 100(1): 218 – 224.
- [47] FERRO A C, DE SOUZA PAGLARINI C, RODRIGUES POLLONIO M A, et al. Glycerol monostearate – based oleogels as a new fat substitute in meat emulsion [J/OL]. *Meat Sci*, 2021, 174: 108424 [2023 – 10 – 30]. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2020.108424>.
- [48] BASCUAS S, ESPERT M, LLORCA E, et al. Structural and sensory studies on chocolate spreads with hydrocolloid – based oleogels as a fat alternative [J/OL]. *LWT – Food Sci Technol*, 2021, 135: 110228 [2023 – 10 – 30]. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110228>.
- [49] SUN P, XIA B, NI Z J, et al. Characterization of functional chocolate formulated using oleogels derived from β – sitosterol with γ – oryzanol/lecithin/stearic acid [J/OL]. *Food Chem*, 2021, 360: 130017 [2023 – 10 – 30]. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130017>.
- [50] GHORGH Z B, YEGANEHZAD S, ALI HESARINEJAD M, et al. Fabrication of novel hybrid gel based on beeswax oleogel: Application in the compound chocolate formulation [J/OL]. *Food Hydrocolloid*, 2023, 140: 108599 [2023 – 10 – 30]. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108599>.

- Pharm Bull, 2007, 55(11): 1620 – 1625.
- [12] 王相凡, 李学红, 于国强, 等. β -环糊精稳定柠檬醛 Pickering 乳液的制备及其稳定性研究[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(24): 124 – 129.
- [13] DICKINSON E. Food emulsions and foams: Stabilization by particles[J]. Curr Opin Colloid Interface Sci, 2010, 15(1/2): 40 – 49.
- [14] PÁEZ – HERNÁNDEZ G, MONDRAGÓN – CORTEZ P, ESPINOSA – ANDREWS H. Developing curcumin nanoemulsion by high – intensity methods: Impact of ultrasonication and microfluidization parameters [J]. LWT – Food Sci Technol, 2019, 111: 291 – 300.
- [15] WANG W, WANG R, YAO J, et al. Effect of ultrasonic power on the emulsion stability of rice bran protein – chlorogenic acid emulsion [J/OL]. Ultrason Sonochem, 2022, 84: 105959 [2023 – 08 – 29]. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.105959>.
- [16] JIN H, WANG X, CHEN Z, et al. Fabrication of β -conglycinin – stabilized nanoemulsion via ultrasound process and influence of SDS and PEG 10000 co – emulsifiers on the physicochemical properties of nanoemulsion [J]. Food Res Int, 2018, 106: 800 – 808.
- [17] 黄欢, 田燕, 刘一哲, 等. 椰子油纳米乳液制备工艺优化及其稳定性分析 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(9): 10 – 19.
- [18] LECLERCQ L, COMPANY R, MÜHLBAUER A, et al. Versatile eco – friendly Pickering emulsions based on substrate/native cyclodextrin complexes: A winning approach for solvent – free oxidations [J]. Chem Sus Chem, 2013, 6(8): 1533 – 1540.
- [19] 李琳琳, 段尊斌, 朱丽君, 等. 基于修饰的 β -环糊精的超分子体系研究及应用进展[J]. 应用化学, 2017, 34(2): 123 – 138.
- [20] 黄娟, 杨宇, 于海燕, 等. 环糊精超分子自组装包合机制研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(3): 258 – 268.
- [21] XIAO Z, LIU Y, NIU Y, et al. Cyclodextrin supermolecules as excellent stabilizers for Pickering nanoemulsion[J/OL]. Colloid Surf, 2020, 588: 124367 [2023 – 08 – 29]. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.124367>.
- [22] JIANG L, PENG Y, YAN Y, et al. " Annular Ring" microtubes formed by SDS @ 2β – CD complexes in aqueous solution [J/OL]. Soft Matter, 2010, 6(8): 1731 [2023 – 08 – 29]. <https://doi.org/10.1039/b920608f>.
- [23] 陈程莉, 李丰泉, 刁倩, 等. 黑枸杞花青素微胶囊优化及理化特性分析[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(5): 208 – 214.
- [24] DAMMAK I, DO AMARAL SOBRAL P J. Effect of different biopolymers on the stability of hesperidin – encapsulating O/W emulsions [J]. J Food Eng, 2018, 237: 33 – 43.
- [25] WANG X, LIU L, XIA S, et al. Sodium carboxymethyl cellulose modulates the stability of cinnamaldehyde – loaded liposomes at high ionic strength [J]. Food Hydrocolloid, 2019, 93: 10 – 18.
- [26] BENJAMIN O, DAVIDOVICH – PINHAS M, SHPIGELMAN A, et al. Utilization of polysaccharides to modify salt release and texture of a fresh semi hard model cheese[J]. Food Hydrocolloid, 2018, 75: 95 – 106.
- [27] 鲁妍, 聂琴, 赵海燕, 等. 光甘草定 – 烟酰胺纳米乳的制备与抗氧化效果[J]. 中南民族大学学报(自然科学版), 2023, 42(5): 620 – 626.
-
- (上接第 130 页)
- [51] SI H, CHEONG L Z, HUANG J, et al. Physical properties of soybean oleogels and oil migration evaluation in model praline system[J]. J Am Oil Chem Soc, 2016, 93(8): 1075 – 1084.
- [52] HUANG Q, WU Y, XU X, et al. Designing novel ice creams using nut oil emulsion gels based on blueberry pectin and CaCl_2 as fat replacers: Insights from physicochemical and sensory properties[J/OL]. Int J Biol Macromol, 2024, 279(Pt 4): 135344 [2023 – 10 – 30]. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135344>.
- [53] LI L, LIU G. Corn oil – based oleogels with different gelation mechanisms as novel cocoa butter alternatives in dark chocolate[J]. J Food Eng, 2019, 263: 114 – 122.
- [54] WENDT A, ABRAHAM K, WERNECKE C, et al. Application of β – sitosterol + γ – oryzanol – structured organogel as migration barrier in filled chocolate products [J]. J Am Oil Chem Soc, 2017, 94(9): 1131 – 1140.
- [55] MORIANO M E, ALAMPRESE C. Organogels as novel ingredients for low saturated fat ice creams [J]. LWT – Food Sci Technol, 2017, 86: 371 – 376.
- [56] SILVA – AVELLANEDA E, BAUER – ESTRADA K, PRIETO – CORREA R E, et al. The effect of composition, microfluidization and process parameters on formation of oleogels for ice cream applications [J/OL]. Sci Rep, 2021, 11(1): 7161 [2023 – 10 – 30]. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86233-y>.
- [57] MARANGONI A G, GARTI N. Edible oleogels: Structure and health implications [M]. 2nd ed. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2018.