

## 新型脂肪替代品双凝胶 (Bigels) 的研究进展

屈琳杭, 李星月, 赵玉凤, 李琪, 张思宇, 于修焯, 高媛

### Research Progress on Novel Fat Substitutes: Bigels

QU Linhang, LI Xingyue, ZHAO Yufeng, LI Qi, ZHANG Siyu, YU Xiuzhu, and GAO Yuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024060062>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

脂肪替代物在肉制品加工中应用的研究进展

Application and Research Progress of Fat Substitutes in Meat Products Processing

食品工业科技. 2025, 46(2): 367-374 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023100265>

传统肉类替代品——人造肉的研究进展

The Research Advance of Traditional Meat Substitutes-Artificial Meat

食品工业科技. 2020, 41(9): 327-333 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.09.053>

油凝胶替代动物脂肪在肉制品中应用的研究进展

Recent Advances in the Application of Oleogel as Fat Replacers in Meat Products

食品工业科技. 2022, 43(14): 467-474 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021070277>

以多糖为基质的脂肪模拟物替代动物脂肪在法兰克福香肠中的应用

Application of Polysaccharide-Based Fat Mimetics to Replace Animal Fat in Frankfurters

食品工业科技. 2021, 42(9): 85-93 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020080025>

复乳凝胶作为脂肪替代物对鸡肉肠理化性质的影响

Effect of Double Emulsion Gels as Fat Replacers on the Physicochemical Properties of Chicken Sausage

食品工业科技. 2020, 41(8): 7-14 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.08.002>

南瓜籽蛋白-卡拉胶乳液脂肪替代物对肌原纤维蛋白凝胶特性的影响

Effect of Fat Substitution in Pumpkin Seed Protein-Carrageenan Emulsion on Myofibrillar Protein Gel Properties

食品工业科技. 2024, 45(16): 138-145 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024010266>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

屈琳杭, 李星月, 赵玉凤, 等. 新型脂肪替代品双凝胶 (Bigels) 的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(11): 369–378. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060062

QU Linhang, LI Xingyue, ZHAO Yufeng, et al. Research Progress on Novel Fat Substitutes: Bigels[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(11): 369–378. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060062

· 专题综述 ·

# 新型脂肪替代品双凝胶 (Bigels) 的研究进展

屈琳杭, 李星月, 赵玉凤, 李 琪, 张思宇, 于修焯, 高 媛\*

(西北农林科技大学食品科学与工程学院, 粮油功能化加工陕西省高校工程研究中心,  
陕西杨凌 712100)

**摘要:** 脂肪是一种重要的供能物质, 同时可赋予食品优良的风味和细腻的口感。然而, 日常饮食中脂肪的过量或不合理摄入, 常常引发肥胖、心血管疾病等一系列健康问题。因此, 低热量、低脂的脂肪替代品备受人们关注。传统的脂肪替代品存在替代后食品风味和感官特性不佳等问题。双凝胶 (Bigels) 是一种特殊的双相凝胶体系, 它由油凝胶和水凝胶在一定的温度下经高速剪切制备而成。由于其兼具油凝胶和水凝胶的品质特性, 近年来关于 Bigels 在食品领域的应用备受瞩目。本文系统阐述了 Bigels 的制备过程、主要特征、脂肪替代机制 (多糖、蛋白、自组装交联等) 和其在食品领域中的脂肪替代应用现状以及面临的挑战, 以期为新型 Bigels 型脂肪替代品的开发利用提供一定的思考和理论依据。

**关键词:** 脂肪替代品, 双凝胶, 替代机制, 应用

中图分类号: TS201.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)11-0369-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060062

本文网刊:



## Research Progress on Novel Fat Substitutes: Bigels

QU Linhang, LI Xingyue, ZHAO Yufeng, LI Qi, ZHANG Siyu, YU Xiuzhu, GAO Yuan\*

(Engineering Research Center for Functional Processing of Grain and Oil, College of Food Science and Engineering,  
Northwest A & F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Lipids, in addition to providing energy, also play an important role in the odor and flavor of food. However, excessive or irrational intake of fat in daily diet often leads to a series of health problems such as obesity and cardiovascular disease. Thus, fat substitutes with low calorie and fat content have gained much attention. Tasteless flavor and poor organoleptic properties of substituted food are the most serious issues existing in the traditional fat substitutes system. Bigels are typical biphasic gel system, which are prepared by high-speed shearing of oleogels and hydrogels at a certain temperature. Recently, more and more attention has been paid to the application of Bigels in food industry due to their quality characteristics of both oleogel and hydrogel. The preparation technologies, main features and the fat replacement mechanism (polysaccharide, protein and self-assembled cross-linked systems) of Bigels, as well as application status and challenges of Bigels has been reviewed in this study. It may provide some theoretical foundation or novel pathway for the development of Bigels fat substitutes.

**Key words:** fat substitutes; Bigels; replacement mechanisms; application

脂肪是现代食品加工的主要原料, 在食物的感官品质中扮演着重要角色, 如提供可塑性质地、良好风味、细腻口感等。随着人们饮食结构的变化, 膳食脂肪的摄入量日益增加, 而体内脂肪的过度堆积所导致的肥胖或超重问题, 已在全球范围内对人类健康产

生了广泛的影响<sup>[1]</sup>。联合国粮食及农业组织 (FAO) 和世界卫生组织建议脂肪占总能量摄入的 20%~35%, 饱和脂肪的摄入应少于总能量的 10%, 反式脂肪摄入量应不超过总能量的 1%<sup>[2]</sup>。同时, 饱和脂肪或反式脂肪摄入过量会增加心血管疾病的发病

收稿日期: 2024-06-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (32201947)。

作者简介: 屈琳杭 (2001-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 新型油脂开发与品质评价, E-mail: linhangqu@nwafu.edu.cn。

\* 通信作者: 高媛 (1990-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 新型油脂开发与品质评价, E-mail: yuangao@nwafu.edu.cn。

率<sup>[3]</sup>。当前,关于如何减少和控制人体对饱和或反式脂肪酸的摄入量,公认的最佳选择是通过减少食物中上述脂肪酸的含量实现。因此,开发高品质、营养健康、绿色环保的脂肪替代品是当前高脂食品领域研究的热点<sup>[4]</sup>。

脂肪替代品可通过部分或完全替代食品中的脂肪以减少其摄入,并提供天然脂肪的质地、风味等<sup>[5]</sup>。目前常见的脂肪替代品有蛋白质类、碳水化合物类、脂质类和复合类等。食品工业中应用较多的脂肪替代形式为油凝胶、乳液凝胶和凝胶微粒<sup>[6]</sup>。油凝胶通过晶体粒子、自组装、聚合物网络或间接模板化等形成三维网络结构,表现出类似于固体脂肪的结构特征<sup>[7]</sup>。乳液凝胶通过液滴的乳化和连续凝胶化,利用组分之间的相互作用力将富含多不饱和脂肪酸的植物油结构化,进而作为动物脂肪替代物应用于食品中,具有含脂食品硬度、保水性、可塑性等特性<sup>[8]</sup>。凝胶微粒主要通过模仿乳化脂肪球的形状和大小,实现脂肪替代<sup>[9]</sup>。以微粒蛋白为例,其通过颗粒表面不断滚动降低表面摩擦阻力,增加光滑度,进而产生奶油状口感,实现模拟脂肪的顺滑特性<sup>[10]</sup>。但上述体系均存在单一组分体系无法完全实现天然脂肪的全部品质特性,不能满足食品工业的实际应用需求,且多组分的复配体系成本较高、推广应用难度较大等问题,如乳液凝胶的制备条件和技术要求较高;油凝胶作为脂肪替代品时,受温度影响较大,高温时易发生漏油现象<sup>[11]</sup>。

双凝胶 Bigels 是新型的凝胶类脂肪替代品,作为一种既含水相也含油相的新型双相体系, Bigels 结合了油凝胶和水凝胶的特性,能够同时递送亲水性和疏水性物质<sup>[12]</sup>。其次, Bigels 的制备过程相对简单,且通过对 Bigels 配方进行设计能够使其具有良好的延展性、风味承载能力强、结构稳定性高及保质期较

长等优势<sup>[13]</sup>。这在一定程度上表明 Bigels 在食品加工过程中不易发生分解或变质,可保证食品的整体质量和安全性,具有比单一凝胶更优越的性能<sup>[14]</sup>。Bigels 在食品脂肪替代中主要发挥模拟脂肪功能、改善食品质量属性以及扩展食品应用范围等作用。与传统的乳液凝胶相比, Bigels 主要通过胶凝剂的三维网络结构限制流动相,可在不加乳化剂或表面活性剂的情况下保持稳定<sup>[15]</sup>。此外, Bigels 的流变性能和热稳定性可实现靶向调控(例如改变水凝胶和油凝胶配方、参数或其配比等)以满足不同产品的实际需求<sup>[16]</sup>。因此, Bigels 是绿色健康、营养丰富且极具发展潜力的脂肪替代品。本文系统介绍了 Bigels 的制备方法、特征、脂肪替代机理及其在食品工业中的应用现状和目前面临的挑战,以期为 Bigels 型脂肪替代品的开发、设计、发展及在未来低脂食品领域的应用提供一定的理论基础。

## 1 Bigels 的制备、特征及脂肪替代应用机理

### 1.1 Bigels 的制备

Bigels 是油凝胶和水凝胶在一定的温度下以高剪切速率结合而成的双相凝胶体系<sup>[17]</sup>,如图 1 所示。由图 1 可知,油凝胶的制备通常需油相和油凝胶剂。在油凝胶的内部,凝胶剂和凝胶剂、凝胶剂和油相相互作用共同构建复杂的三维网络结构<sup>[18]</sup>。油凝胶的制备方法可以大致分为直接法和间接模板法。其中,直接法又细分为晶体颗粒、自组装和聚合物网络法;间接模板法又包括乳液模板法、气凝胶模板法等<sup>[19]</sup>。且制备油凝胶通常需要加热至 70 °C 以上并快速剪切混合,待冷却后使其形成稳定的凝胶网络结构。而水凝胶需要水相和水凝胶剂,制备时可以先混合加热再冷却,也可在室温条件下直接剪切混合制备<sup>[20]</sup>。水凝胶的制备可以通过物理交联和化学交

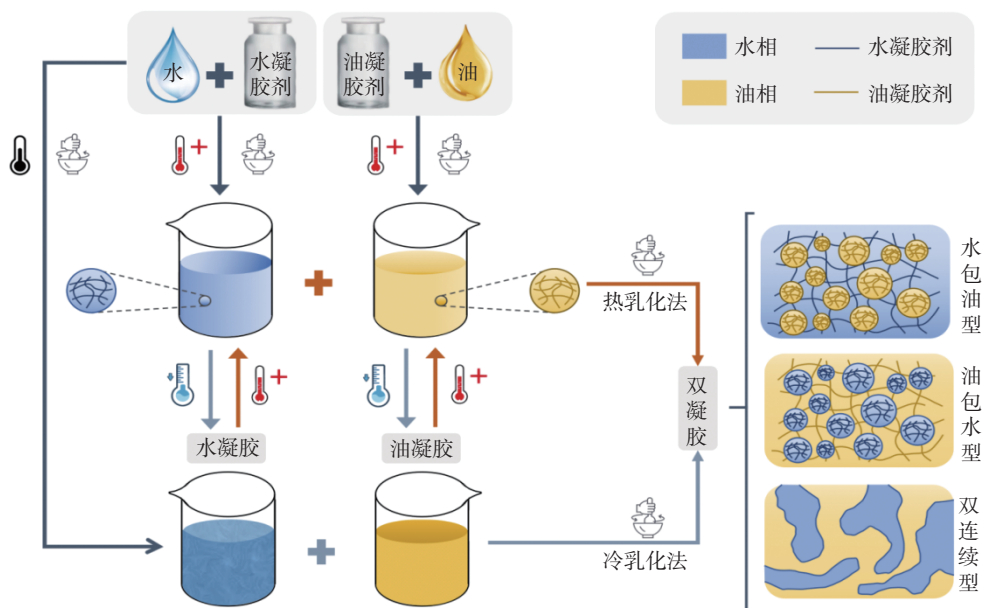


图 1 Bigels 制备过程示意图

Fig.1 Schematic diagram of the Bigels preparation process

联两种途径,目前应用于食品级 Bigels 的水凝胶通常是由天然聚合物制备,主要为蛋白质和多糖类物质<sup>[21]</sup>。根据制备过程中温度的差异,Bigels 的制备技术可分为热乳化和冷乳化。热乳化是指油、水两相及两相混合的剪切制备均在较高的温度(一般为 70 ℃ 及以上)下进行。这时,由于温度较高,两相均呈液体状,Bigels 生成速度快,体系均一性好,目前应用较为广泛<sup>[14]</sup>。冷乳化指在室温下将油凝胶和水凝胶进行混合剪切制得 Bigels。该技术能够较好地保护热敏性较差的原料的稳定性<sup>[22]</sup>。因此,对于热稳定较差的水凝胶,更适合采用冷乳化法制备 Bigels。此外,根据油凝胶和水凝胶在 Bigels 中的分布情况,将 Bigels 分为水凝胶包油凝胶型(O/W)、油凝胶包水凝胶型(W/O)和双连续复合物型这三大类<sup>[23]</sup>。一般地,制备的 Bigels 中油凝胶浓度低于 50% 时,Bigels 表现出 O/W 型;当油凝胶和水凝胶含量相等时,Bigels 转变为双连续型;进一步将油凝胶浓度提高到 70%,Bigels 变成 W/O 型<sup>[24]</sup>。其中,O/W 型 Bigels 通常具有轻盈的质地,赋予食品清爽的口感,一般应用于低脂酱料、沙拉酱等产品中;W/O 型 Bigels 的油相在外层形成保护膜,使食品具有更好的口感持久性和浓郁度。一般应用于巧克力、烘焙食品或油炸食品等产品中;双连续型 Bigels 适用于一些功能性食品,如营养补充剂、特殊膳食食品等。此外,双连续型 Bigels 也应用于创新型食品的开发,如新型零食或特色调味品。但双连续凝胶的形态容易受轻微搅动或温度和溶液条件的变化而遭到破坏,双连续凝胶的稳定性是其应用的主要限制因素之一<sup>[25]</sup>。

## 1.2 Bigels 的主要特征

Bigels 是通过热乳化或冷乳化技术制备的油、水两相共存体系。与其他单相和双相系统相比,在室温下具有稳定性高、机械性能和热性能好、可操作性强等优势<sup>[26]</sup>,Bigels 的双相体系也为递送生物活性物质提供了更多可能,为食品赋予更高的营养价值。据此,Bigels 在脂肪替代方面显示出巨大的应用潜力<sup>[27]</sup>。具体品质特性如下。

**1.2.1 质构特性和理化性质** Bigels 可改善单一相脂肪替代过程中的感官质量、机械性能和整体适口性降低等问题<sup>[28]</sup>。Bigels 独特的粘弹性行为使其在外观和力学性能上更接近半固体脂肪。通常,可通过分析 Bigels 的相分布状态、构成比和液滴尺寸来获得 Bigels 的宏观和微观特性(质构、流变、结晶等)。如,水凝胶包油凝胶型 Bigels 的微观结构可观察到油相的分布及水相的密度和粘弹性是影响 Bigels 相稳定性的主要原因<sup>[29]</sup>。此外,Zheng 等<sup>[30]</sup>在研究油凝胶含量对凝胶结构的作用时发现,Bigels 的力学性能和结构稳定性主要受油凝胶组分的影响。随着油凝胶含量的增加,凝胶的存储模量、刚度、断裂应力等逐渐提高,且当 Bigels 转变为双连续结构或 W/O 结构时,提高幅度最大。同时,从流变学上看,含有较

高油凝胶组分的 Bigels 由于其更大的粘弹性行为而具有更高的热稳定性<sup>[31]</sup>。通常地,Bigels 的粘弹性、硬度和溶胀能力很大程度上决定了其在食品固体脂肪替代中的性能表现<sup>[32]</sup>。生产实际中可通过使用更高分子量的聚合物、支链聚合物或更高馏分的聚合物、基质胶、油凝胶剂和水凝胶获得更粘稠的 Bigels 体系,从而达到预期的脂肪替代效果<sup>[33-34]</sup>。最重要的是,Bigels 体系的刚性和弹性特性与其油相内晶体的变化呈正相关,且在一定程度上影响其与替代食品体系的相容性<sup>[26]</sup>。综上,Bigels 体系具有较好的适口性、较高的热稳定性、较好的粘弹性、硬度、溶胀能力和食品相容性,其与半固体脂肪品质类似,且 Bigels 可以通过调控凝胶剂种类、油水凝胶相比、制备温度等条件实现其质构、流变、稳定性等特性的靶向控制,从而获得最理想的脂肪替代体系。

**1.2.2 营养属性** 在营养属性方面,相比于传统的脂肪,Bigels 应用于替代脂肪系统能够增加产品的不饱和和脂肪含量。这种系统不仅可改善产品的营养成分,还可增加其生物活性化合物的生物利用度<sup>[35]</sup>。从原料上,用于食品产业脂肪替代的 Bigels 多数采用可食用级别油凝胶和天然水凝胶,保证可食用性以及产品的绿色健康<sup>[36]</sup>。其次,食品中固体脂肪的替代本质上降低了消费者对该产品的能量摄入,保障国民健康。Bigels 由于独特的组成和结构,具有良好的递送生物活性物质的能力,使其在替代固体脂肪的同时可以有效地递送并保护生物活性物质,以满足功能性食品需求<sup>[37]</sup>。

## 1.3 Bigels 的脂肪替代机制

脂肪与食品的颜色、保水能力、微观结构特征和颗粒大小、风味、气味等都息息相关<sup>[38]</sup>。脂肪替代目的旨在减少脂肪含量的同时保证其原有品质不变或处于可接受范围内。乳液凝胶和油凝胶是当前应用较广的食品体系脂肪替代技术<sup>[39]</sup>。

Bigels 体系既含脂质基物质,具有亲油性和脂质的加工功能特性等,又含有非脂质物(如蛋白质、碳水化合物等),具有亲水性,可经过结构修饰等技术使其具有与脂肪类似的理化性质和功能性质<sup>[40]</sup>。目前 Bigels 在食品中替代脂肪的可能机制如图 2 所示。

Bigels 替代脂肪时,往往通过特殊的理化和加工特性改造以模仿脂肪,在维持食品原有形态结构的基础上提供与全脂产品性质相当的脂肪替代产品。由图 2 可知,Bigels 替代脂肪的机制有:a. 多糖类物质替代机制:多糖分子经物理或化学方法作用,使其与水分子结合形成网络凝胶或含水乳化体系,进而部分代替原食品体系内纯油脂体系,实现改善食品体系连续相的结构特性,并产生类似于脂肪的风味、流动性和口感,最终达到降低食品中脂肪含量的目的<sup>[41]</sup>。即该法主要通过胶体化稳定食品体系中的水分,实现其奶油特征和流动性等来实现脂肪替代剂的作用<sup>[42]</sup>;b. 蛋白质类物质替代机制:蛋白类物质经自发形成或

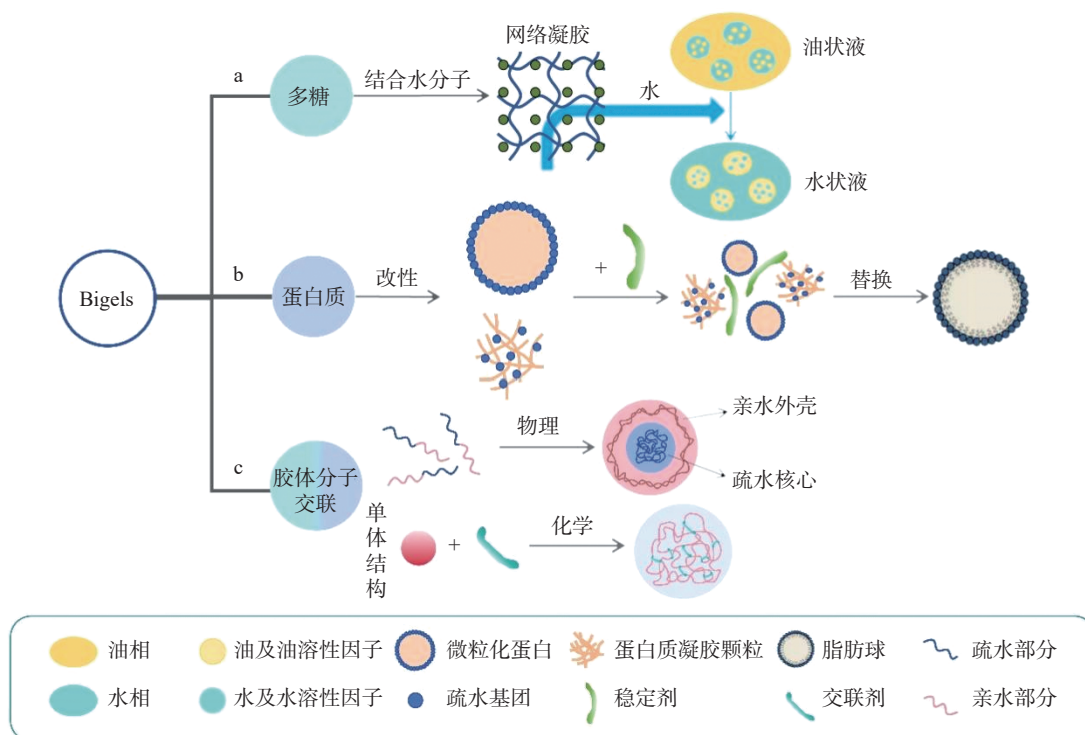


图 2 Bigels 在食品中的脂肪替代机制

Fig.2 Mechanism of fat substitution in food by Bigels

诱导加工改造,生成与脂肪球、脂肪乳滴等大小和形状相似的微粒,从而实现模拟脂肪和替代<sup>[43]</sup>。即用于脂肪替代的蛋白质颗粒可产生与脂肪相似的质地、流变学和感官特性;c.其他可产生具有类似脂肪球滴结构的胶体体系替代机制:具有交联作用的胶体颗粒经自组装,形成具有特殊形状和定向结合能力的胶体结构,进而在食品体系中的骨架结构中扮演脂肪的角色,进而实现脂肪替代<sup>[44]</sup>。

因此, Bigels 进行脂肪替代可能是由于相内大分子物质或胶体分子之间通过共价/非共价键相互作用形成骨架结构和脂肪质感进而实现脂肪替代的目的,其特定的三维网络功能性结构可使被替代食品体系的持水性、乳化性、起泡性和凝胶性得以改善或提高,从而使食品具有脂肪润滑、口感细腻和组织结构完整等品质特性。

## 2 Bigels 作为脂肪替代品在食品工业中的应用

Bigels 在食品领域的脂肪替代应用主要体现在其独特的双相结构,使其能够在不改变食品原有风味和质地的前提下,有效替代传统脂肪。这不仅有助于降低食品中的饱和脂肪酸含量,还能提供一种健康的含脂食品,以满足消费者对健康饮食的需求<sup>[45]</sup>。当前, Bigels 在食品领域的主要应用如图 3 所示。

由图 3 可知, Bigels 作为脂肪替代品主要应用于肉制品、乳制品、烘焙产品、调味品以及其他产品等。其具体替代方式和替代效果见表 1。

### 2.1 肉制品

脂肪在肉制品的质构、风味等方面发挥着十分重要的作用<sup>[46]</sup>。当前降低肉制品中固体脂肪和饱和



图 3 Bigels 在脂肪替代中的应用

Fig.3 Application of Bigels in fat replacement

脂肪含量的方法有两种:a.直接在喂养过程或加工过程中降低肉类或肉制品脂肪含量<sup>[47]</sup>;b.使用不同类型的脂肪替代物,如利用蛋白质、淀粉、膳食纤维等材料制备低脂肉制品。此外,不同凝胶类和 Bigels 型脂肪替代物也是研究的热点。

由表 1 可知,用 Bigels 双凝胶部分替代发酵香肠中猪肉背膘<sup>[48]</sup>。在发酵和成熟期间, Bigels 替代不影响香肠的水活性和菌群分布;与对照组相比, Bigels B60 和 Bigels B80 替代组的脂肪含量分别降低了 15.08% 和 23.83%。Zampouni 等<sup>[49]</sup>对半干香肠中猪肉背膘进行 Bigels 替代,香肠产品具有较高的水分含量和水分活度且不影响体系总活菌数和乳酸菌种群;此外,其能量、脂肪、饱和脂肪酸和胆固醇含量均有所降低,感官接受度较好。再者, Bigels 替

表 1 Bigels 在脂肪替代方面应用的部分研究

Table 1 Partial researches of the application of Bigels in fat replacement

| 应用产品  | 凝胶制备材料                    | 制备方法  | 替代方法   | 主要替代效果   | 参考文献 |
|-------|---------------------------|---|--|--|------|
| 发酵香肠  | 橄榄油、单甘油酯、明胶和κ-卡拉胶         | 制备两种不同的Bigels: Bigels B60、Bigels B80  | 分别用9%猪背膘、9% Bigels B60和9%猪背膘、9% Bigels B80处理;用18%的猪肉背膘作对照  | 与对照组相比, 替代脂肪所得香肠在颜色、质地、多汁性、风味、味道和总体可接受度方面无显著差异     | [48] |
| 半干香肠  | 橄榄油油凝胶与κ-卡拉胶、κ-卡拉胶和明胶水凝胶  | 两种水凝胶分别以80:20的比例与相同的橄榄油油胶混合制备BG1和BG2  | 分别用含10%猪肉背膘、10% BG1和10%猪背膘、10% BG2进行处理;用含20%猪背膘作对照   | 凝胶香肠和对照组香肠在颜色、香气、口感和总体接受度方面相似                      | [49] |
| 牛肉汉堡  | 淀粉、乙基纤维素、葵花籽油             | 凝胶化的乙基纤维素油凝胶(25℃)与热淀粉糊(85℃)以不同比例混合  | 用H25:O75比例的Bigels配制25%、50%和75%的动物脂肪替代物   | 感官评估具有可接受的分数                                       | [31] |
| 牛肉饼   | κ-卡拉胶、藻油、聚山梨醇酯            | 将含有藻油和聚山梨醇酯(比例为0.12 g/100 g油)与κ-卡拉胶混合   | 用新鲜制备的凝胶乳液替代完全替代猪肉背膘;对照组添加猪背膘脂肪调节至9%的脂肪含量  | 脂肪和脂肪酸含量降低, 二十碳五烯酸和二十二碳六烯酸含量提高                     | [50] |
| 商业奶油  | 玉米油、分离乳清蛋白、黄原胶、ALG        | 向油凝胶(由30wt%玉米油、5wt%乳清蛋白和2wt%黄原胶制备)内掺入ALG制备Bigels                                    | Bigels和奶油以不同的比例混合(Bigels分别占混合物的25%、50%和75%)  | 表现出明显的热稳定性和油结合能力;模拟的乳霜在质地、流变属性和感官特性方面表现出了最佳的一致性    | [55] |
| 奶油类似物 | MCT油、单月桂酸甘油、肉桂醛、壳聚糖       | 油相(单月桂酸甘油酯自组装)+水相(肉桂醛液滴与壳聚糖交联凝胶化)制备Bigels   | 改变Span 80浓度(0%、0.3%、0.6%和0.9%)和油相浓度(20%、33%和40%)   | 添加Span 80可创建更均匀、光滑的Bigels结构, 更好模拟真正奶油的特性           | [56] |
| 涂抹黄油  | 芝麻油、肉桂油、BW、ALG、WPC        | 芝麻油+BW; ALG+WPC; 混合制备普通Bigels和肉桂Bigels(区别在于有无添加肉桂油)                                 | 将肉桂Bigels与牛奶奶油混合形成肉桂bgb, 以相同的方式制备普通bgb作对照  | 肉桂bgb中的不饱和脂肪酸含量和抗氧化活性高于普通bgb, 过氧化值低于普通bgb          | [57] |
| 低乳脂酸奶 | 乳清蛋白水解物、柑橘皮的果胶、菜籽油        | 将粗O/W乳液进行均质化处理  | 从全脂奶粉和脱脂奶粉中制备了全脂搅拌酸奶, 用乳化液代替50%的乳脂   | 整体可接受性优于全脂酸奶                                       | [58] |
| 饼干    | CO、BW、ALG、CMC             | BW与CO制备油凝胶; 聚合物(ALG、CMC)与蒸馏水(3%, w/w)制备水凝胶; 油凝胶与水凝胶以50/50(w/w)混合制备Bigels            | 饼干类型: Bigels(BW-ALG和BW-CMC)、蜂蜡油(BW-O)、菜籽油(CO)、商业人造黄油(CM)和原味起酥油(OS)                               | 凝胶饼干具有与原始起酥油相似的硬度                                  | [61] |
| 饼干    | 小烛树蜡、菜籽油、玉米淀粉             | 小烛树蜡+菜籽油; 玉米淀粉+水; 热处理后混合、均质、冷却  | 双相凝胶代替起酥油(替代百分比25%、50%、75%和100%)制作饼干   | 凝胶替代饼干的脂肪含量降低高达50%且淀粉消化率增高                         | [62] |
| 面包    | 小麦淀粉、BW、水、OEO             | 淀粉+葵花籽油搅拌, 加热后加入蜂蜡和蒸馏水, 90℃持续混合, 后冷却至50℃, 滴加30%(干淀粉重量, v/w)浓度的OEO                   | 以氢化植物脂肪为对照, 基于未发芽和发芽小麦淀粉的油凝胶替换氢化植物脂肪制备面包   | 降低了硬度并保持比容; 抑制了总嗜温菌和真菌的生长                          | [63] |
| 蛋黄酱   | ALG、鸡蛋、菜籽油、白醋             | ALG溶液+蛋黄乳液, 以醋诱导凝胶形成  | 仅含蛋黄(未添加ALG)的缓冲溶液作为对照  | 低脂蛋黄酱与含油量75%的全脂蛋黄酱产品性质相当                           | [64] |
| 蛋黄酱   | GMS、精制椰子油、CSG、明胶、WPC、葵花籽油 | CSG+WPC+明胶(室温)制备水凝胶; 5%GMS+精制椰子油(90℃)制备油凝胶  | 30 g Bigels样品添加到去离子水中, 1 g糖+1 g盐+5 g蛋黄粉+4 mL醋+15 mL葵花籽油, 均质; 全脂蛋黄酱: 1 g糖+1 g盐+5 g蛋黄+4 mL醋+65%菜籽油 | CSG Bigels蛋黄酱表现出与全脂蛋黄酱相似的流动行为、粘弹性和可恢复性             | [65] |
| 沙拉酱   | 亚麻籽油、n-OSA淀粉、酪蛋白酸钠        | 淀粉加热预胶化; n-OSA淀粉+酪蛋白酸钠+油+醋+预胶化玉米淀粉  | 全葵花籽油(样品1)和全亚麻籽油(样品2)沙拉酱配方、用亚麻籽油代替葵花籽油, 亚麻籽油占总油的14.28%w/w(样品3)和28.57%w/w(样品4)(35%)、添加8.7%蛋黄(样品5) | 配方中使用亚麻籽油(浓度5%)使感官属性的整体可接受性更高                      | [66] |
| 沙拉酱   | 玉米油、BW、GMO、KGM、支链淀粉、β-CD  | 玉米油+GMO+BW; 内部水相+KGM+支链淀粉+β-CD;   | 设置不同浓度的蜂蜡和内部水相的体积分数  | 与单独使用凝胶聚糖的油凝胶相比, 使用凝胶糖+支链淀粉或凝胶糖+β-CD混合物可以提高粘弹性和稳定性 | [67] |
| 巧克力   | ALG、BW、GSO                | 60 mL GSO+20%BW; 10 mL 2%ALG水凝胶; 以水凝胶:油凝胶(0:100、1:99、5:95、10:90)比例混合                | 将水凝胶:油凝胶比为5:95的Bigels样品用于生产含Bigels的复合巧克力, 四种替代水平(0%、15%、30%和45%)替代品                              | 凝胶部分替代的巧克力样品与对照样品相似                                | [68] |
| 巧克力酱  | 玉米油、GMS、水                 | GMS+20%(w/w)玉米油, 加热搅拌; 水:油凝胶(重量比)分别为0:100、45:55、50:50和55:45                         | 对照: 100%的油凝胶; 实验样品以45:55的水:油胶比制成的乳液取代油凝胶制备巧克力酱   | 低脂巧克力酱的感官评分和可接受性与全脂样品相当                            | [69] |
| 非乳制奶精 | MCT、皂苷、磷酸盐缓冲液             | MCT含量: 1%、2.5%、5%、7.5%、10%、12.5%和15%; 表面活性剂: 油恒定为1:15; 皂苷分散到磷酸盐缓冲液; 水相与油相(终浓度15%)混合 | 将乳液和缓冲溶液以不同比例混合, 制备具有不同含油量的模型奶精  | 模型奶精效果与商用非乳制品奶精相当                                  | [70] |

注: Bigels B60和Bigels B80分别指由60%水相、40%脂质相和80%水相、20%脂质相制成的Bigels; BG1: 水凝胶相中的凝胶剂为2%w/w κ-卡拉胶和2.125%w/w Span 20, BG2: 水凝胶相中的凝胶剂为2%w/w κ-卡拉胶加4%w/w明胶; H: Hydrogel水凝胶, O: Oleogel油凝胶, H25: O75表示水凝胶与油凝胶的混合比例为25:75; ALG: 海藻酸钠; MCT: 中链甘油三酸酯; BW: 蜂蜡; Span 80: 山梨醇酐油酸酯; WPC: 浓缩乳清蛋白; CO: 冷榨菜籽油; CMC: 羧甲基纤维素; OEO: 橙子精油; GMS: 单硬脂酸甘油酯; CSG: 冷榨奇亚籽油副产品胶质; n-OSA: 辛烯基琥珀酸; GMO: 甘油单油酸酯; KGM: 魔芋葡甘聚糖; β-CD: β-环糊精; GSO: 葡萄籽油。

代肉饼脂肪的低脂汉堡具有更好的烹饪特性,且与其替代量呈正相关关系<sup>[31]</sup>。当替代量高达50%时,产品具有最好的感官特性。此外,以新型O/W双凝胶作为动物脂肪替代品制作肉饼,其脂肪含量减少了70%,二十碳五烯酸和二十二碳六烯酸含量提高了55%,且感官评价结果较好<sup>[50]</sup>。综上,利用Bigels对香肠、汉堡、肉饼等肉制品进行脂肪替代,可使肉制品中脂肪含量降低并能保证肉制品品质基本保持不变。

## 2.2 乳制品

随着人们饮食结构改变和对营养健康的日益关注,低脂乳制品越来越受到广大消费者的青睐。低脂乳制品主要是通过减少配料中的脂肪以达到目的。但单纯地减少配料中的乳脂含量会对产品的结构稳定性、质地、感官属性和外观等产生不良影响<sup>[51]</sup>。为克服以上不足,脂肪替代是当前制备低脂乳制品的主要技术手段。如部分蛋白质、多糖及其混合物等作为脂肪替代物已成功用于冰淇淋<sup>[52]</sup>、酸奶<sup>[53]</sup>和奶酪<sup>[54]</sup>等乳制品中。

由表1可知,蛋白-纤维素复合型Bigels可用于制备乳清蛋白衍生的奶油类似物<sup>[55]</sup>。Cui等<sup>[56]</sup>制备的壳聚糖基双凝胶具有作为奶油替代品或模仿奶油特性的能力。Hashim等<sup>[57]</sup>以芝麻油凝胶和海藻酸盐水凝胶为材料制备新型黄油涂抹酱。bgb(Bigels butter spread)产品的化学成分无明显变化。但随着贮藏时间的延长,pH略有下降。肉桂Bigels黄油酱抗氧化活性高于普通bgb。Trujillo-Ramírez等<sup>[58]</sup>利用Bigels替代乳脂(50%)生产低脂乳脂酸奶。结果表明,该复合物可替代乳脂、稳定性强、流变特性优异且感官接受度高于全脂乳脂酸奶。综上,Bigels可对乳制品脂肪进行替代,并产生类似脂肪的黏度、透光度和质构特性,提供类似脂肪的口感,在很大程度上可模拟真正奶油的特性。

## 2.3 烘焙产品

脂肪在烘焙食品中扮演着多重角色,如润滑面团、改善口感和风味、提升产品的色泽和外观。同时,脂肪在化学层面也起到稳定面糊、延缓老化的作用。然而,过量摄入脂肪对健康不利,因此需合理控制其使用量<sup>[59]</sup>。目前,各种各样的脂肪替代品和模拟物已应用于烘焙行业。这些脂肪替代材料都有不同的特性,对食品质量的影响也各不相同<sup>[60]</sup>。Bigels作为烘焙食品脂肪替代品的新型研究对象,近来备受关注。

由表1可知,Quilaqueo等<sup>[61]</sup>评估了Bigels用作饼干中脂肪替代品的作用,Bigels延缓了液体油的氧化进程,且所得的饼干具有与原始起酥油所制备相似的硬度。使用菜籽油/山茶黄油凝胶和糊化玉米淀粉水凝胶制备的Bigels以不同比例替换商用起酥油制备饼干,大幅降低了饼干的脂肪含量<sup>[62]</sup>。另外,结合小麦淀粉、葵花籽油、蜂蜡和橙子精油(OEO)制

备Bigels来替代面包中的氢化植物脂肪<sup>[63]</sup>。结果表明,Bigels基面包具有较高的储存稳定性、载油量、更高的粘附性和更低的硬度。综上,在烘焙食品中使用Bigels替代脂肪,可以赋予烘焙产品更优异的质构特性。特别是在改善其外观、结构和质地等方面显示出巨大潜力。

## 2.4 调味品

当前,调味酱高端化趋势日益增强,消费者除关注原料与配料是否绿色和安全外,更关注产品的营养健康特性。常见的经典酱料(如沙拉酱、蛋黄酱、芝麻酱等)虽然口感醇厚、味道香浓,但其脂肪含量和胆固醇含量都很高,过量摄入会对人体心血管系统等造成不良影响。利用脂肪替代品降低调味酱中脂肪含量,同时模拟酱料相当的质构和口感是目前调味酱的主要发展方向。

由表1可知,Yang等<sup>[64]</sup>通过海藻酸盐和蛋黄蛋白构建的凝胶体系具有显著的粘弹性、触变性和可塑性,经冻干后的高含油量干乳液凝胶在pH为5.8时具有较好的分散性,可以用于生产与全脂蛋黄酱产品具有相似的流变特性但含油量较低的低脂蛋黄酱产品。报道显示,单硬脂酸甘油酯(GMS)油凝胶与不同多糖和蛋白稳定的水凝胶相结合可制备出Bigels型低脂蛋黄酱,且其品质特性随油凝胶/水凝胶的比例不同而变化。其中含油凝胶50%和70%OG的Bigels型低脂蛋黄酱具有与全脂蛋黄酱相当的流变特性<sup>[65]</sup>。Dehghan等<sup>[66]</sup>采用n-OSA(辛烯基琥珀酸)淀粉和酪蛋白酸钠稳定亚麻籽油,制备Bigels体系。所得体系为弱凝胶状结构,可作为脂肪替代物减少脂肪在沙拉酱中的应用。除此之外,采用蜂蜡基油相结合 $\beta$ -环糊精基水相构建Bigels低脂沙拉酱,所得样品体系分布均匀,液滴尺寸小,冻融稳定性好<sup>[67]</sup>。综上,Bigels在调味品脂肪替代的应用中,能够基本模拟全脂调味酱的品质特性。

## 2.5 其他产品

除上述几类食用产品外,Bigels应用于脂肪替代还出现在巧克力制品、非乳制奶精等食品生产中。由表1可知,Ghorghi等<sup>[68]</sup>研究表明水相与油相(w/w)比为5:95,添加量为15%时,所得巧克力与未添加Bigels的对照组品质最为接近。利用Bigels替代制备低脂巧克力酱时,45:55(w/w)Bigels取代制得的巧克力酱微观结构完整性、水活度、卡森粘度、屈服应力、线性粘弹性区域、硬度和铺展性等与全脂产品相当<sup>[69]</sup>。此外,以MCT为油相、丁香皂苷为植物基表面活性剂的O/W型乳液凝胶制备模型奶精与商用非乳制品奶精类似,且表现粘度随着液滴浓度的增加而增加<sup>[70]</sup>。

总之,Bigels体系可作为脂肪替代品在肉制品、乳制品、烘焙产品、调味品和糖果类产品中应用,在减少食品中固体脂肪含量的同时可赋予所应用食品更优良的加工、风味、质构、营养及健康属性。这

可为新型低脂食品靶向研发提供新的途径。

### 3 Bigels 在食品领域应用面临的挑战

Bigels 在食品领域作为脂肪替代物展现出巨大的应用前景。同时,也存在着 Bigels 的稳定性易受影响、Bigels 中各组分之间相互作用的机制研究尚不充分、食品级 Bigels 制备成本较高、如何根据特殊人群的食品需求实现定制设计等技术难题。具体情况如下所述。

#### 3.1 食品口感与质构复现性不足

Bigels 在模拟天然食品的复杂质构方面还存在一定的困难,难以完全复制出天然脂肪醇厚口感以及所赋予食品的丰富质构特性(硬度、粘性、咀嚼性和弹性等)。例如,在模拟肉类的质构时,双凝胶无法同时具备肉类的纤维感、嚼劲和多汁性等特点<sup>[71]</sup>。此外,利用 Bigels 部分替代动物脂肪在肉肠硬度、咀嚼性和弹性值等方面优于完全替代<sup>[72]</sup>。传统脂肪能使酥饼等烘焙产品具有酥碎的质感和浓郁的香味,而双凝胶替代后导致面团硬度、粘性升高,延展性降低,进而缺乏所需的起酥油效果,这在生产特定形状的烘焙产品时不具有优势<sup>[73]</sup>。

由于 Bigels 的结构稳定性受多种因素(两相凝胶剂的种类及浓度、油水比例、混合温度和速度、储存条件等)影响,在食品加工、储存和运输过程中,这些因素的变化使得双凝胶在实际应用中难以保持其结构和功能特性,从而影响食品的质构<sup>[74]</sup>。因此,为进一步模拟 Bigels 在食品应用中的口感与质构,提升 Bigels 的稳定性具有重要意义。目前,研究人员尝试选择天然大分子(如酪蛋白、明胶等)作凝胶剂与稳定剂、“密封”内外界面和减小乳滴尺寸等途径提高 Bigels 的结构稳定性。如,利用蜂蜡/植物甾醇酯油凝胶和明胶/乳清蛋白分离物水凝胶制备的 Bigels 作为黄油的替代品,油凝胶含量为 60wt% 的 Bigels 在 25 °C 下放置 30 d 时表现出优异的保水性和保油性<sup>[75]</sup>。Guo 等<sup>[76]</sup>用结冷胶基水凝胶和蜂蜡基油凝胶制备了 O/W、双连续和 W/O 三种类型 Bigels,经搅打得到 Bigels 基泡沫。观察微观结构得到两种泡沫稳定模型:基于 O/W Bigels 泡沫中液滴积聚并吸附在气泡表面或周围;基于 W/O Bigels 泡沫中油气界面由晶体稳定、双连续型在搅打过程中相变为 W/O 结构,由结晶包裹气泡。气泡掺入油凝胶基质中是降低其热含量同时保持或增强其流变学和口感特性的可行途径,有助于进一步合理地设计和开发各类低脂的充气食品<sup>[77]</sup>。

#### 3.2 食品风味保留与释放待优化

Bigels 作为新兴材料,可以形成稳定的网络结构以防止风味物质的挥发和扩散,且具有良好的控制释放效果<sup>[78]</sup>。由于实现定制的风味释放尚未得到广泛应用,需要进一步扩展对 Bigels 的配方设计,侧重于研究 Bigels 对食品储存稳定性、冻融稳定性、风味保留和释放行为的调节作用。如,基于乳清蛋白微胶

(WPM)的 Bigels 与基于乳清分离蛋白(WPI)的 Bigels 相比,表现出物理刺激反应性和更好的风味保留特性,在冻融循环中表现出卓越的保油性和延长的风味释放。同时发现,蛋白质浓度的升高增强了凝胶界面稳定性,这有助于减慢游离脂肪酸的释放和脂质的消化<sup>[79]</sup>。此外,基于硬脂酸的油凝胶与基于魔芋葡甘露聚糖(KGM)-明胶(G)的二元水凝胶 Bigels,可通过改变凝胶的 KGM/G 质量比( $\gamma$ )和油凝胶/水凝胶体积比( $\varphi$ )得以控制 Bigels 的微观结构和流变特性,从而实现了风味的定制释放<sup>[80]</sup>。除此之外,在高含油量的食品中,油脂的抗氧化特性极大程度上影响着食品储存前后风味的复现效果。凝胶可凭借网络结构的物理屏障、抗氧化剂的高效嵌入或原料的抗氧化性能等显著提高液体油的抗氧化能力<sup>[81]</sup>。如,以甘油单月桂酸酯的油凝胶和结冷胶的水凝胶制备 Bigels,1:3 的油凝胶/水凝胶比例 Bigels 表现出优异的冻融稳定性,在三个冻融循环后保持>95% 的持油能力。同时,其还表现出良好的氧化稳定性,储存 12 d 时过氧化物值和丙二醛含量分别低于 0.07 g/100 g 和 1.5 mg MDA/kg,有效避免了食品油脂风味的缺失<sup>[82]</sup>。

#### 3.3 产品营养品质与生物利用待提升

近年来,人们对食品营养属性的要求逐渐提高,消费者越来越关注食品的营养价值,并将其作为选购食品的重要因素之一。Bigels 体系能够同时递送亲水性和疏水性活性物质,且具有较高的储藏稳定性,使其在食品递送生物活性物质方面具有显著潜力。如,在胃消化过程中,乳液凝胶、水凝胶和乳液中抗坏血酸自爱释放,而 Bigels 能够使抗坏血酸受控地胃释放,且具有更好的热稳定性<sup>[83]</sup>。未来有望发展 Bigels 作为纳米载体,通过保护生物活性物质、增强其稳定性和穿透胃肠道屏障的能力,显著提高生物活性物质的生物利用度<sup>[84]</sup>。综上,Bigels 在递送生物活性物质、提高食品营养性能上表现出色。然而,Bigels 对于递送多种生物活性物质时精确控制每种物质的释放能力仍具有较大的挑战,未来需要进一步优化以实现复杂的多物质递送系统。

#### 3.4 产品成本与工艺条件待优化

Bigels 的制备通常需要考虑凝胶剂、油/水凝胶比例、油脂性质以及制备工艺等多个因素<sup>[15]</sup>。这些因素的精确控制需要专业的设备和技术人员,增加了制备过程的复杂性和成本。其次,当前用于食品的凝胶剂种类较少,且高质量的原材料通常价格较高,在市场上的供应相对有限,这也导致了 Bigels 成本的增加。

目前,可通过寻找价格较低、性能相似的原材料替代品可以大大降低成本。如,马铃薯淀粉、海藻酸钠、黄原胶和卡拉胶是成本较低且凝胶效果良好的选择,并且通过复配不同的凝胶剂,优化凝胶的性能并降低成本<sup>[85]</sup>。其次,通过使用生物聚合物、聚合型

乳化剂等,可以提高 Bigels 的稳定性并控制活性物质的释放,这不仅可以延长产品的保质期,还可以减少因产品失效而产生的额外成本。在实际应用中,优化加工工艺是一种有效的降低成本手段。例如,使用先进的微流控技术和自动化生产线可以减少人工成本和提高生产效率。微流控技术在制备过程中展现出的稳定可控、制备成功率高且单分散性优良的特点,可以减少材料的浪费,从而降低生产成本<sup>[86]</sup>。此外,通过提高 Bigels 的产品附加值,降低对原材料成本的敏感度。例如,开发具有抗菌、抗氧化等功能的 Bigels 产品,提高产品的市场竞争力,同时增强消费者对产品整体价值的认知。最后,通过加强供应链管理,可大大降低采购、运输和储存成本。

#### 4 结论与展望

Bigels 作为一种新型体系,在医药、化妆等行业都已广泛使用,而在食品领域中的应用尚处于初探阶段。本文系统综述了 Bigels 的制备技术、主要特征以及其替代食品中脂肪的作用机理,同时阐述了 Bigels 作为脂肪替代的应用现状和面临的挑战。当前 Bigels 在食品工业中的脂肪替代主要局限于实验室,其在产业应用和推广过程中存在众多难题,但同时也孕育着重大机遇。因此,本文建议后续研究应重点聚焦于 Bigels 中各组分作用机制、提升 Bigels 稳定性、降低 Bigels 制备成本、探究 Bigels 协同不同特性营养物质靶向递送等方面,使 Bigels 投入到食品脂肪替代应用的同时提升食品的整体价值,以推动 Bigels 脂肪替代的产业化应用与发展。当前正处于多学科交叉融合研究的繁荣时期,这将为食品级 Bigels 的开发提供更多可能,更好地推动 Bigels 在可调控型健康食品领域的应用进展。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

#### 参考文献

- [1] 夏娟,卓勤,何宇纳.膳食脂肪摄入与慢性病相关性的研究进展[J]. *中国食物与营养*, 2015, 21(11): 64-67. [XIA J, ZHUO Q, HE Y N. Research progress on relationship between dietary fat intake and chronic disease[J]. *Food and Nutrition in China*, 2015, 21(11): 64-67.]
- [2] BAJŽELJ B, LAGUZZI F, RÖÖS E. The role of fats in the transition to sustainable diets[J]. *The Lancet Planetary Health*, 2021, 5(9): e644-e653.
- [3] CENA H, CALDER P C. Defining a healthy diet: Evidence for the role of contemporary dietary patterns in health and disease[J]. *Nutrients*, 2020, 12(2): 334.
- [4] TEMKOV M, MUREȘAN V. Tailoring the structure of lipids, oleogels and fat replacers by different approaches for solving the trans-fat issue—A review[J]. *Foods*, 2021, 10(6): 1376.
- [5] M Y, C K S, S S, et al. Protein-based fat replacers—A review of recent advances[J]. *Food Reviews International*, 2021, 37(2): 197-223.
- [6] GAO Y X, ZHAO Y, YAO Y, et al. Recent trends in design of healthier fat replacers: Type, replacement mechanism, sensory evaluation method and consumer acceptance[J]. *Food Chemistry*, 2024, 447: 138982.
- [7] BARROSO N G, OKURO P K, RIBEIRO A P B, et al. Tailoring properties of mixed-component oleogels: Wax and monoglyceride interactions towards flaxseed oil structuring[J]. *Gels*, 2020, 6(1): 5.
- [8] 冯扬扬,徐敬欣,于栋,等.乳液凝胶替代动物脂肪在肉制品中应用的研究进展[J]. *食品科学*, 2019, 40(21): 236-242. [FENG Y Y, XU J X, YU D, et al. Recent advances in the application of emulsion gels as fat replacers in meat products[J]. *Food Science*, 2019, 40(21): 236-242.]
- [9] KEW B, HOLMES M, STIEGER M, et al. Review on fat replacement using protein-based micro particulated powders or microgels: A textural perspective[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2020, 106: 457-468.
- [10] LIU K, TIAN Y J, STIEGER M, et al. Evidence for ball-bearing mechanism of micro particulated whey protein as fat replacer in liquid and semi-solid multi-component model foods[J]. *Food Hydrocolloids*, 2016, 52: 403-414.
- [11] DAVIDOVICH-PINHAS M, BARBUT S, MARANGONI A G. The gelation of oil using ethyl cellulose[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2015, 117: 869-878.
- [12] CHAO E P, LI J W, DUAN Z H, et al. Bigels as emerging biphasic systems: Properties, applications, and prospects in the food industry[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 154: 110089.
- [13] HAMED R, ABU ALATA W, ABU-SINI M, et al. Development and comparative evaluation of ciprofloxacin nanoemulsion-loaded Bigels prepared using different ratios of oleogel to hydrogels[J]. *Gels*, 2023, 9(7): 592.
- [14] SHAKEEL A, LUPI F R, GABRIELE D, et al. Bigels: A unique class of materials for drug delivery applications[J]. *Soft Materials*, 2018, 16(2): 77-93.
- [15] 牛文霞,唐嘉悦,尚亚卓.新型乳化体系及其在化妆品中的应用(II)——Bigels体系[J]. *日用化学工业(中英文)*, 2023, 53(10): 1132-1139. [NIU W X, TANG J Y, SHANG Y Z. New emulsion system and its application in cosmetics (II) Bigels system[J]. *China Surfactant Detergent & Cosmetics*, 2023, 53(10): 1132-1139.]
- [16] HU X F, JIANG Q B, DU L Y, et al. Edible polysaccharide-based oleogels and novel emulsion gels as fat analogues: A review[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2021, 322: 1376.
- [17] SAGIRI S S, SINGH V K, KULANTHAIVEL S, et al. Stearate organogel-gelatin hydrogel based bigels: Physicochemical, thermal, mechanical characterizations and *in vitro* drug delivery applications[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2015, 43: 1-17.
- [18] SIVAKANATHAN S, FAWZIA S, MADHUJITH T, et al. Synergistic effects of oleogelators in tailoring the properties of oleogels: A review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2022, 21(4): 3507-3539.
- [19] ZHAO W J, WEI Z H, XUE C H. Recent advances on food-grade oleogels: Fabrication, application and research trends[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022, 62(27): 7659-7676.
- [20] MARTÍN-ILLANA A, NOTARIO-PÉREZ F, CAZORLA-LUNA R, et al. Bigels as drug delivery systems: From their components to their applications[J]. *Drug Discovery Today*, 2022, 27(4): 1008-1026.
- [21] LI M Y, HOU X R, LIN L S, et al. Legume protein/polysaccharide food hydrogels: Preparation methods, improvement strategies and applications[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 243: 125217.

- [ 22 ] 张倩, 蒋玲, 王启明, 等. 双凝胶在食品领域: 从组成到应用[J]. *食品科学*, 2024, 45(6): 277-284. [ ZHANG Q, JIANG L, WANG Q M, et al. Bigels in food field: From composition to application[J]. *Food Science*, 2024, 45(6): 277-284. ]
- [ 23 ] FRANCAVILLA A, CORRADINI M G, JOYE I J. Bigels as delivery systems: Potential uses and applicability in food[J]. *Gels*, 2023, 9(8): 648.
- [ 24 ] QIU R K, WANG K, TIAN H, et al. Analysis on the printability and rheological characteristics of bigel inks: Potential in 3D food printing[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 129: 107675.
- [ 25 ] HASHEMI B, ASSADPOUR E, JAFARI S M. Bigels as novel carriers of bioactive compounds: Applications and research trends[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 147: 109427.
- [ 26 ] VERSHKOV B, DAVIDOVICH-PINHAS M. The effect of preparation temperature and composition on bigel performance as fat replacers[J]. *Food & Function*, 2023, 14(8): 3838-3848.
- [ 27 ] MARTINS A J, SILVA P, MACIEL F, et al. Hybrid gels; Influence of oleogel/hydrogel ratio on rheological and textural properties[J]. *Food Research International*, 2019, 116: 1298-1305.
- [ 28 ] BLUMLEIN A, MCMANUS J J. Bigels formed via spinodal decomposition of unfolded protein[J]. *Journal of Materials Chemistry B*, 2015, 3(17): 3429-3435.
- [ 29 ] MARTINS A J, GUIMARÃES A, FUCIÑOS P, et al. Food-grade Bigels: Evaluation of hydrogel:oleogel ratio and gelator concentration on their physicochemical properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 143: 108893.
- [ 30 ] ZHENG H X, MAO L K, CUI M N, et al. Development of food-grade bigels based on  $\kappa$ -carrageenan hydrogel and monoglyceride oleogels as carriers for  $\beta$ -carotene: Roles of oleogel fraction[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 105: 105855.
- [ 31 ] GHIASI F, GOLMAKANI M T. Fabrication and characterization of a novel biphasic system based on starch and ethylcellulose as an alternative fat replacer in a model food system[J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2022, 78: 103028.
- [ 32 ] ZAMPOUNI K, MOUZAKITIS C K, LAZARIDOU A, et al. Physicochemical properties and microstructure of bigels formed with gelatin and  $\kappa$ -carrageenan hydrogels and monoglycerides in olive oil oleogels[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 140: 108636.
- [ 33 ] SHAKEEL A, FAROOQ U, IQBAL T, et al. Key characteristics and modelling of bigels systems: A review[J]. *Materials Science and Engineering: C*, 2019, 97: 932-953.
- [ 34 ] BEHERA B, SAGIRI S S, SINGH V K, et al. Mechanical properties and delivery of drug/probiotics from starch and non-starch based novel bigels: A comparative study[J]. *Starch*, 2014, 66(9-10): 865-879.
- [ 35 ] GONÇALVES R F, ZHOU H, VICENTE A A, et al. Plant-based bigels for delivery of bioactive compounds: Influence of hydrogel:oleogel ratio and protein concentration on their physicochemical properties[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 150: 109721.
- [ 36 ] DOMÍNGUEZ R, MUNEKATA P E, PATEIRO M, et al. Immobilization of oils using hydrogels as strategy to replace animal fats and improve the healthiness of meat products[J]. *Current Opinion in Food Science*, 2021, 37: 135-144.
- [ 37 ] ZHU Q M, GAO J B, HAN L J, et al. Development and characterization of novel bigels based on monoglyceride-beeswax oleogel and high acyl gellan gum hydrogel for lycopene delivery[J]. *Food Chemistry*, 2021, 365: 130419.
- [ 38 ] ZHUANG Y, DONG J, HE X M, et al. Impact of heating temperature and fatty acid type on the formation of lipid oxidation products during thermal processing[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2022, 9: 913297.
- [ 39 ] 王杨, 李贝贝, 陈森高, 等. 脂肪替代物在肉制品中的研究及应用进展[J]. *肉类研究*, 2023, 37(10): 57-65. [ WANG Y, LI B, CHEN S G, et al. Research and application of fat substitutes in meat products[J]. *Meat Research*, 2023, 37(10): 57-65. ]
- [ 40 ] 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*, 2023, 39(8): 5501-5527.
- [ 41 ] 苏娅宁, 杨慧娟, 陈韬. 低脂凝胶类肉制品脂肪替代及改性的研究进展[J]. *肉类研究*, 2021, 35(9): 51-57. [ SU Y N, YANG H J, CHEN T. Progress in fat substitution and modification in low-fat gel-type meat products[J]. *Meat Research*, 2021, 35(9): 51-57. ]
- [ 42 ] WANG J L, SHANG M S, LI X J, et al. Polysaccharide-based colloids as fat replacers in reduced-fat foods[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2023, 141: 104195.
- [ 43 ] 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.
- [ 44 ] LI F, JOSEPHSON D P, STEIN A. Colloidal assembly: The road from particles to colloidal molecules and crystals[J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2011, 50(2): 360-388.
- [ 45 ] GÓMEZ-ESTACA J, HERRERO A M, HERRANZ B, et al. Characterization of ethyl cellulose and beeswax oleogels and their suitability as fat replacers in healthier lipid pâtés development[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 87: 960-969.
- [ 46 ] PENG X Y, YAO Y. Carbohydrates as fat replacers[J]. *Annual Review of Food Science and Technology*, 2017, 8: 331-351.
- [ 47 ] 王丽, 向荣辉, 王辉, 等. 脂肪替代物在肉制品中的应用[J]. *粮食与油脂*, 2020, 33(2): 7-9. [ WANG L, JU R H, WANG H, et al. The application of fat substitutes in meat products[J]. *Cereals & Oils*, 2020, 33(2): 7-9. ]
- [ 48 ] SIACHOU C, ZAMPOUNI K, KATSANIDIS E. Bigels as fat replacers in fermented sausages: Physicochemical, microbiological, sensory, and nutritional characteristics[J]. *Gels*, 2023, 9(4): 340.
- [ 49 ] ZAMPOUNI K, FILIPPOU A, PAPADIMITRIOU K, et al. Evaluation of bigel systems as potential substitutes to partially replace pork backfat in semi-dry sausages[J]. *Meat Science*, 2024, 208: 109392.
- [ 50 ] ALEJANDRE M, PASSARINI D, ASTIASARÁN I, et al. The effect of low-fat beef patties formulated with a low-energy fat analogue enriched in long-chain polyunsaturated fatty acids on lipid oxidation and sensory attributes[J]. *Meat Science*, 2017, 134: 7-13.
- [ 51 ] 徐聃, 杜宇虹, 孔保华. 脂肪替代物在乳制品中的研究与应用进展[J]. *食品科技*, 2006(11): 28-32. [ XU D, DU Y H, KONG B H. Development of research and applications of fat replacers in milk products[J]. *Food Science and Technology*, 2006(11): 28-32. ]
- [ 52 ] AKBARI M, ESKANDARI M H, DAVOUDI Z. Application and functions of fat replacers in low-fat ice cream: A review[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2019, 86: 34-40.
- [ 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 ] STANKEY J A, LU Y, ABDALLA A, et al. Low-fat Cheddar cheese made using micro-particulated whey proteins: Effect on yield and cheese quality[J]. *International Journal of Dairy Technology*, 2017, 70(4): 481-491.
- [ 55 ] JIANG L, WANG Q M, RAO Z N, et al. Formulation and characterization of bigels utilizing whey protein and polysaccharides: Potential applications as cream analogues[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 152: 109884.
- [ 56 ] CUI H H, TANG C E, WU S, et al. Fabrication of chitosan-

- cinnamaldehyde-glycerol monolaurate bigels with dual gelling effects and application as cream analogs[J]. *Food Chemistry*, 2022, 384: 132589.
- [ 57 ] HASHIM A F, EL-SAYED S M, EL-SAYED H S. Bigel formulations based on sesame oleogel with probiotics alginate hydrogel: A novel structure for nutritious spreadable butter[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 242: 124782.
- [ 58 ] TRUJILLO-RAMIREZ D, OLIVARES-MARTINEZ I, LOBATO-CALLEROS C, et al. Impact of the droplet size of canola oil-in-water emulsions on the rheology and sensory acceptability of reduced-milk fat stirred yogurt[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2022, 59(12): 4853–4862.
- [ 59 ] COLLA K, COSTANZO A, GAMLATH S. Fat replacers in baked food products[J]. *Foods*, 2018, 7(12): 192–203.
- [ 60 ] 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. ]
- [ 61 ] QUILAQUEO M, ITURRA N, CONTARDO I, et al. Food-grade bigels with potential to replace saturated and trans fats in cookies[J]. *Gels*, 2022, 8(7): 445–461.
- [ 62 ] BARRAGÁN-MARTÍNEZ L P, ROMÁN-GUERRERO A, VERNON-CARTER E J, et al. Impact of fat replacement by a hybrid gel (canola oil/candelilla wax oleogel and gelatinized corn starch hydrogel) on dough viscoelasticity, color, texture, structure, and starch digestibility of sugar-snap cookies[J]. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 2022, 29: 100563.
- [ 63 ] SILVA F T, SANTOS F N, FONSECA L M, et al. Oleogels based on germinated and non-germinated wheat starches and orange essential oil: Application as a hydrogenated vegetable fat replacement in bread[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253(1): 126610.
- [ 64 ] YANG X, LI A Q, YU W Y, et al. Structuring oil-in-water emulsion by forming egg yolk/alginate complexes: Their potential application in fabricating low-fat mayonnaise-like emulsion gels and redispersible solid emulsions[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 147: 595–606.
- [ 65 ] ALKABAA AS, AKCICEK A, TAYLAN O, et al. Production of novel Bigels from cold pressed chia seed oil by-product: Application in low-fat mayonnaise[J]. *Foods*, 2024, 13(4): 574.
- [ 66 ] DEHGHAN MANSHADI A, PEIGHAMBARDUST S H, AZADMARD-DAMIRCHI S, et al. Oxidative and physical stability, rheological properties and sensory characteristics of 'salad dressing' samples formulated with flaxseed oil and n-OSA starch[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2019, 13(1): 26–33.
- [ 67 ] WANG F Y, GUO L, LIU H, et al. Water-in-oil oleogel with biphasic stabilization for fabrication of low-fat salad dressing[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 142: 108805.
- [ 68 ] GHORGHI Z B, YEGANEHZAD S, HESARINEJAD M A, et al. Fabrication of novel hybrid gel based on beeswax oleogel: Application in the compound chocolate formulation[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 140: 108599.
- [ 69 ] TIRGARIAN B, YADEGARI H, BAGHERI A, et al. Reduced-fat chocolate spreads developed by water-in-oleogel emulsions[J]. *Journal of Food Engineering*, 2023, 337: 111233.
- [ 70 ] CHUNG C, SHER A, ROUSSET P, et al. Impact of oil droplet concentration on the optical, rheological, and stability characteristics of O/W emulsions stabilized with plant-based surfactant: Potential application as non-dairy creamers[J]. *Food Research International*, 2018, 105: 913–919.
- [ 71 ] ALEJANDRE M, ASTIASARÁN I, ANSORENA D, et al. Using canola oil hydrogels and organogels to reduce saturated animal fat in meat batters[J]. *Food Research International*, 2019, 122: 129–136.
- [ 72 ] KIBLER N D, ACEVEDO N C, CHO K, et al. Novel biphasic gels can mimic and replace animal fat in fully-cooked coarse-ground sausage[J]. *Meat Science*, 2022, 194: 108984.
- [ 73 ] NUTTER J, SHI X, LAMSAL B, et al. Plant-based bigels as a novel alternative to commercial solid fats in short dough products: Textural and structural properties of short dough and shortbread[J]. *Food Bioscience*, 2023: 102865.
- [ 74 ] ZHENG R, CHEN Y, WANG Y, et al. Microstructure and physical properties of novel bigel-based foamed emulsions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 134: 108097.
- [ 75 ] PANG M, XU L, GE W F, et al. Fabrication of beeswax/plant sterol ester-gelatin/whey protein isolate bigels with dual gelation effects as substitutes for traditional solid fats[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 157: 110458.
- [ 76 ] GUO Z X, LI Y F, SONG X Y, et al. Stabilization models of foams prepared from whipable bigels: Crystal absorption and droplet stability[J]. *Food Hydrocolloids*, 2024, 147: 109383.
- [ 77 ] LIU Y, BINKS B P. Fabrication of stable oleofoams with sorbitan ester surfactants[J]. *Langmuir*, 2022, 38(48): 14779–14788.
- [ 78 ] SHAKEEL A, FAROOQ U, GABRIELE D, et al. Bigels and multi-component organogels: An overview from rheological perspective[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021: 106190.
- [ 79 ] LIU L, WANG W B, DUAN S L, et al. Novel Pickering bigels stabilized by whey protein microgels: Interfacial properties, oral sensation and gastrointestinal digestive profiles[J]. *Food Research International*, 2024, 188: 114352.
- [ 80 ] TIAN W, HUANG Y, SONG Z, et al. Flexible control of bigel microstructure for enhanced stability and flavor release during oral consumption[J]. *Food Research International*, 2023, 174: 113606.
- [ 81 ] MILLAO S, ITURRA N, CONTARDO I, et al. Structuring of oils with high PUFA content: Evaluation of the formulation conditions on the oxidative stability and structural properties of ethylcellulose oleogels[J]. *Food Chemistry*, 2023: 134772.
- [ 82 ] WANG X Y, LI H, LIU Y, et al. A novel edible solid fat substitute: Preparation of biphasic stabilized bigels based on glyceryl monolaurate and gellan gum[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 263: 130081.
- [ 83 ] KAIMAL A M, SINGHAL R S. Bigels for controlled gastric release of ascorbic acid: Impact on rheology, texture, thermal stability and antioxidant activity[J]. *Food Hydrocolloids for Health*, 2023, 4(15): 100171.
- [ 84 ] SAWANT R B, NIKAM S P, ROY A, et al. Nanocarriers for nutraceutical delivery: A miniaturized revolution in health[J]. *Nano-Structures&Nano-Objects*, 2024, 39: 101321.
- [ 85 ] 祁芸, 王娜, 杨光, 等. 具有 pH 响应的食用凝胶的制备工艺研究[J]. *化工技术与开发*, 2022, 51(9): 6–9,75. [ QI Y, WANG N, YANG G, et al. Preparation of pH responsive edible gel[J]. *Technology & Development of Chemical*, 2022, 51(9): 6–9,75. ]
- [ 86 ] PAIBOON N, SURASSMO S, RUNGSARDTHONG RUKTANONCHAI U, et al. Internal gelation of alginate microparticle prepared by emulsification and microfluidic method: Effect of Ca-EDTA as a calcium source[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 141: 108712.