DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260429005
引用格式: 侯雨佳, 赵晓琪, 郑佩琦, 等. 淀粉基乳液填充凝胶的形成及其应用研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(12): 189–198.
HOU YJ, ZHAO XQ, ZHENG PQ, *et al*. Research progress on formation and application of starch-based emulsion-filled gel [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(12): 189–198. (in Chinese with English abstract).

淀粉基乳液填充凝胶的形成及其应用研究进展

侯雨佳, 赵晓琪, 郑佩琦, 马静银, 杨涵钰, 王紫嫣, 崔荣荣, 饶　欢,
刘学强, 赵丹丹, 赵　霞*, 郝建雄*

(河北科技大学食品与生物学院, 石家庄　050000)

摘　要: 乳液填充凝胶为凝胶网络包裹油滴的结构, 其兼具乳液的分散包埋功能和凝胶网络的结构稳定性, 可改善体系稳定性、质构特性及活性物质递送性能等。该体系在食品、制药、化妆品等工业展现出广阔的应用前景。淀粉具有来源广泛、成本低、生物相容性好, 且在胃消化阶段无酶解反应、对 pH 和离子强度高稳定性等特点, 基于淀粉构建的乳液填充凝胶体系在功能因子肠道靶向递送、替代脂肪组织等方面表现出显著的结构优势, 已成为相关领域的研究热点。淀粉基乳液填充凝胶的功能特性与其内部结构密切相关, 而体系结构受淀粉凝胶基质、油相组成及二者相互作用的共同影响。尽管已有研究关注淀粉凝胶特性、乳液稳定性、功能因子递送和脂肪替代等方面, 但针对其结构形成机制、调控因素及应用特性的综合梳理仍需进一步完善。基于此, 本文从体系形成机制、影响因素及其在功能因子递送和脂肪替代中的应用等方面进行总结, 以期为淀粉基乳液填充凝胶的加工利用及相关功能体系设计提供理论参考。

关键词: 乳液凝胶; 多糖; 脂肪替代; 生物活性; 结构

Research progress on formation and application of starch-based emulsion-filled gel

HOU Yu-Jia, ZHAO Xiao-Qi, ZHENG Pei-Qi, MA Jing-Yin, YANG Han-Yu, WANG Zi-Yan, CUI Rong-Rong, RAO Huan, LIU Xue-Qiang, ZHAO Dan-Dan, ZHAO Xia*, HAO Jian-Xiong*

(*College of Food Science and Biology*, *Hebei University of Science and Technology*, *Shijiazhuang* 050000, *China*)

ABSTRACT: Emulsion-filled gel is a structure where oil droplets are encapsulated by a gel network. It combines the dispersion and encapsulation functions of emulsions with the structural stability of gel networks, enhancing system stability, texture and bioactive compound delivery. This system has demonstrated broad application prospects in industries such as food, pharmaceuticals and cosmetics. Starch, being widely available, low-cost and biocompatible,

收稿日期: 2026-04-29
基金项目: 河北省自然科学基金项目(C2024208017); 河北省高等学校科学研究项目(QN2025124); 石家庄市科技计划项目(241170352A); 大学生创新训练计划项目(202510082024)
第一作者: 侯雨佳(2004—), 女, 主要研究方向为农产品加工与质量安全。E-mail: 15530152980@163.com
***通信作者:** 赵霞(1997—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为农产品加工与质量安全。E-mail: zhaoxiaspkx@163.com
郝建雄(1979—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为食品安全控制。E-mail: cauhjx@163.com

performs no enzymolysis reaction in the stomach digestion stage, high stability to pH and ionic strength. The starch-based emulsion-filled gel shows significant structural advantages in the intestinal targeting delivery of functional factors and fat tissue substitute, and it has become a research hotspot in the related fields. Their functional properties of starch-based emulsion-filled gel are closely related to internal structure, which is influenced by the starch gel matrix, oil composition and interactions. Previous studies focuses on starch gel properties, emulsion stability, functional compound delivery and fat replacement, but comprehensive reviews on formation mechanisms, regulatory factors and applications remain limited. This article summarized the formation mechanism of the system, the influencing factors, as well as its application in the delivery of functional factors and fat substitution to provide a theoretical reference for the processing, utilization and functional design of starch-based emulsion-filled gels.

KEY WORDS: emulsion gel; polysaccharides; fat substitute; biological activity; structure

0 引 言

乳液凝胶是通过乳化剂稳定体系中的油滴形成乳液, 随后经凝胶化连续相或乳液液滴聚集而形成的一种具有凝胶网状结构的半固态乳液体系[1–2]。奶酪、酸奶和蛋黄酱等一些常见的食品体系均属于乳液凝胶。根据成胶机制不同, 乳液凝胶可分为乳液填充凝胶和乳液微粒凝胶[3]。其中, 乳液填充凝胶的结构为油滴嵌在生物聚合物交联形成的凝胶网络中(图 1a), 而乳液微粒凝胶由液滴聚集形成网络结构(图 1b)。乳液微粒凝胶通常呈现较差的抗变形能力, 而乳液填充凝胶因其生物聚合物分子网络结构而对环境应力具有良好的稳定性[4]。基于凝胶基质中生物聚合物组成的不同, 乳液填充凝胶可分为蛋白质基乳液填充凝胶、多糖基乳液填充凝胶和低分子量化合物基乳液填充凝胶等[2]。淀粉是自然界中储量仅次于纤维素的天然高分子聚合物, 具有可再生、价格低廉以及安全性高(无抗原性、生物相容性好)等特点, 因而被广泛应用于食品、医药和化工等领域[5–6]。积极对淀粉资源进行开发, 加强对淀粉新技术、新工艺和新产品的研究, 有利于促进我国淀粉深加工业的良性发展, 提高产业水平和经济效益, 实现淀粉的高值化利用。淀粉分子富含羟基, 分子间易通过氢键相互作用形成凝胶网络, 表现出良好的凝胶行为, 其已成为构建乳液填充凝胶体系的重要原料来源[7]。

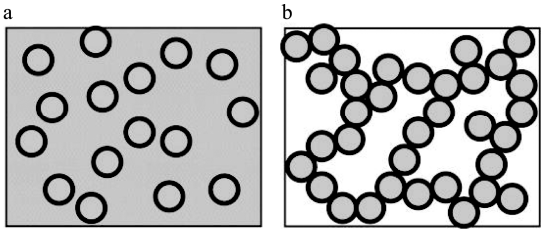


图 1 乳液填充凝胶(a)和乳液微粒凝胶(b)示意图[3]

Fig.1 Schematic presentation of emulsion-filled gel (a) and emulsion particulate gel (b) [3]

过量摄入脂肪会增加肥胖、心血管疾病甚至癌症的发生风险[8], 推动低脂食品发展是保持人体健康、控制常见疾病的重要辅助手段。然而, 固体脂肪的去除会对产品的质地和消费者的感官接受度产生负面影响。在保持食品质地和感官质量的前提下, 减少脂肪含量是食品工业面临的一项挑战[9–10]。动物脂肪组织由结缔组织三维网络包裹脂肪细胞构成。乳液填充凝胶呈现类似脂肪组织的结构特点, 其被认为是替代食品中固体脂肪的杰出策略[11–12]。此外, 基于油滴嵌入凝胶基质的独特结构, 乳液填充凝胶结合了乳液和水凝胶的优势。一方面, 油滴的存在可以使乳液填充凝胶实现增加对脂溶性功能因子的溶解; 另一方面, 水凝胶网络将油滴固定在凝胶结构内, 其可以作为屏障保护功能因子抵御外界环境影响, 实现对功能因子的可控释放。乳液填充凝胶作为一种富有前景的新型脂溶性功能因子递送载体, 近年来引起了研究人员的广泛关注[4,9]。本文分析总结了淀粉的结构、乳化特性、凝胶特性等与乳液填充凝胶构建相关特性及其影响因素, 阐述了淀粉基乳液填充凝胶的形成及其在功能因子递送和动物脂肪组织替代等方面的应用, 以期为乳液填充凝胶的加工与利用以及功能因子递送载体和脂肪替代物的结构设计提供一定的理论依据和技术指导。

1 淀粉概述

1.1 淀粉的乳化特性

淀粉由于亲水性较高或颗粒尺寸较大, 通常不适合直接作为乳化剂或乳液稳定剂, 需进行改性后使用。目前相关研究主要集中在通过疏水改性向淀粉中引入疏水性基团、淀粉与疏水物质复合以及降低淀粉颗粒尺寸等方面对淀粉的乳化性能进行改善[13]。

通过辛烯基琥珀酸酐(octenyl succinic anhydride, OSA)[13]和乙酸酐[14]等改性方式使淀粉分子上的羟基被疏水性基团取代或将淀粉与蛋白质等疏水性物质复合形成复合物(如淀粉-玉米醇溶蛋白复合物)可以有效提高淀粉的疏水性。该复合物中蛋白质相对 pH 变化敏感, 使得其可作为 pH 响应材料[15]。此外, 由于低成本和优异的乳化能力, 将淀粉与 OSA 进行酯化反应, 使淀粉分子接枝 OSA 基团

是改善淀粉乳化性的一种高效方法[16–18]。与以蛋白质为乳化剂的乳液相比, OSA 淀粉稳定的乳液对 pH 变化具有更高的耐受力。颗粒态和分子态 OSA 淀粉均可以作为两亲性物质稳定油滴, 其中, 颗粒态 OSA 淀粉作为颗粒稳定剂形成 Pickering 乳液, 而 OSA 淀粉分子作为乳化剂稳定油滴得到传统乳液[2,19]。与传统乳液相比, Pickering 乳液因固体颗粒可在油-水界面产生不可逆吸附而具有较高的稳定性, 近年来引起了研究人员浓厚兴趣[5]。

降低固体颗粒尺寸有利于提升其乳化能力, 从而提高乳液稳定性[20]。颗粒尺寸是颗粒稳定剂的重要参数。在分别由 OSA 大米淀粉(5~10 μm)、OSA 玉米淀粉(10~20 μm)和 OSA 马铃薯淀粉(20~30 μm)稳定的 Pickering 乳液中, 具有较小尺寸的淀粉颗粒经 OSA 改性后形成了具有最小液滴粒径和最低乳析指数的乳液[21]。酸解、非溶剂沉淀、超声和研磨等改性方式已被用来降低淀粉颗粒尺寸[22]。特别地, 纳米材料具有比表面积大、反应活性高和吸附性强等特点, 通过对淀粉改性生产纳米级淀粉颗粒作为颗粒稳定剂备受关注[23]。该颗粒被证明具有良好的润湿性, 其三相接触角接近 90°, 可以形成稳定的乳液[5]。与通过 OSA 疏水改性改善淀粉颗粒乳化性相比, 纳米级淀粉颗粒的制备存在一定局限性, 如成本较高、耗时较长或制备过程相对复杂等, 但形成的乳液具有粒径小、稳定性强等优势。

1.2　淀粉的胶凝特性

淀粉分子存在大量羟基, 分子间易通过氢键相互作用形成凝胶网络结构, 是构建天然生物聚合物基凝胶材料的重要原料[24]。在食品工业中, 淀粉的凝胶化通常经加热糊化实现。在糊化过程中, 淀粉颗粒的分子缔合结构被破坏, 水分子进入颗粒, 与淀粉分子结合, 淀粉颗粒表现为吸水膨胀, 淀粉分子从颗粒浸出; 随着糊化的进行, 颗粒内部的有序结构破坏程度增加, 淀粉颗粒进一步膨胀并发生崩解, 淀粉分子最终以离散状态分散在水相中[25]。淀粉凝胶化的实质为淀粉颗粒中淀粉分子间氢键在热量作用下发生振动断裂, 此时为不稳定状态, 当水分子存在时, 淀粉分子与水分子通过氢键结合, 即淀粉-淀粉分子间氢键转变为淀粉-水分子间氢键, 从而使游离水减少, 体系黏度增加; 在后续冷却过程中, 分散在水相中的无序淀粉分子运动减缓, 淀粉分子通过氢键结合重新排列形成相互缠绕的三维网络结构[26]。在不同糊化阶段, 淀粉以不同的状态存在于体系中。其中, 在较低温度下, 体系由膨胀的淀粉颗粒与溶出的淀粉分子共同组成, 随温度的增加, 淀粉颗粒完全崩解, 体系变为纯淀粉分子[27]。

2　淀粉基乳液填充凝胶的形成

2.1　淀粉基乳液填充凝胶的构建

乳液填充凝胶是乳液嵌入凝胶基质网络而形成的一类黏弹性半固态物质[1]。其中, 分散的液滴为填料, 聚合物凝胶为凝胶基质。按照油滴与凝胶基质之间相互作用的强弱, 乳液液滴通常可分为非活性填料和活性填料。前者与凝胶网络之间作用较弱, 容易在凝胶形成过程中产生结构缺陷, 削弱凝胶强度; 后者则能够通过氢键、疏水相互作用、静电作用或颗粒桥联等方式参与网络构建, 使液滴成为凝胶网络的一部分, 从而提高体系的弹性和稳定性[28]。在乳液填充凝胶形成中, 乳化剂在均质、剪切和超声等机械混合作用下吸附在油滴表面, 通过降低油滴界面张力、物理阻隔和静电斥力等效应形成稳定的乳液; 随后, 经凝胶化乳液水相或油-水界面处的聚合物发生交联而形成凝胶网络结构[1,24]。

淀粉基乳液填充凝胶的结构为油滴嵌入聚合物(淀粉)交联形成的凝胶基质中。热诱导是一种简单易行且被广泛采用的淀粉凝胶化方法。在此过程中, 淀粉颗粒受热糊化, 淀粉分子从颗粒内被释放到体系中形成三维网络结构。淀粉基乳液填充凝胶的形成通常需经历乳液制备、淀粉水凝胶制备以及乳液和水凝胶混合等过程(图 2)[29]。首先, 在均质、剪切或超声作用下, 油相被分散为细小液滴, 乳化剂或固体颗粒吸附于油水界面, 并通过降低界面张力、空间位阻、静电斥力或界面物理屏障等作用抑制液滴聚并, 从而形成相对稳定的乳液体系[1,26,30]。随后, 连续相中的淀粉在加热过程中发生糊化, 淀粉颗粒吸水膨胀、结晶结构被破坏, 部分直链淀粉溶出; 在冷却过程中, 溶出的淀粉分子进一步通过氢键重建、链段缠结和分子重排形成三维凝胶网络。随后将乳液掺入淀粉凝胶中制成乳液填充凝胶, 基于淀粉基凝胶网络实现对油滴的空间固定[31]。若油滴界面层与淀粉凝胶基质之间能够形成氢键、疏水相互作用或其他非共价作用, 则油滴可作为活性填料参与网络构建并增强凝胶强度; 反之, 若油滴与基质间相互作用较弱, 则其更接近非活性填料, 可能破坏凝胶网络连续性并削弱力学性能[1,17,29]。其中, 在以 OSA 淀粉分子为乳化剂的天然淀粉凝胶基乳液填充凝胶中, 体系网络的形成归因于多种作用力的共同结果, 即凝胶基质中淀粉分子的羟基存在氢键作用力; 油-水界面处 OSA 淀粉与油滴之间的疏水相互作用, 以及与相邻的 OSA 淀粉稳定的液滴形成疏水网络; 油-水界面处的 OSA 淀粉分子和凝胶基质中的天然淀粉分子通过氢键结合[29]。

此外, 表 1 总结了近年来淀粉基乳液填充凝胶体系的构建研究, 涵盖了不同种类淀粉、不同类型乳化剂及不同构建方式等, 如通过热诱导 OSA 淀粉颗粒稳定的 Pickering 乳液发生胶凝成功形成块状淀粉基乳液填充凝胶体系[34]; 以马铃薯淀粉为凝胶基质, 以乳清蛋白为乳化剂稳定油滴共同形成淀粉基乳液凝胶[33], 以及通过 pH 调节明胶与玉米淀粉静电相互作用构建乳液填充凝胶体系[38]等。淀粉基乳液填充凝胶研究逐渐从基于热诱导的单一淀粉基体系拓展到蛋白-淀粉复合界面、离子诱导交联、乳液凝胶珠等复杂界面与形成方式的多形态体系。

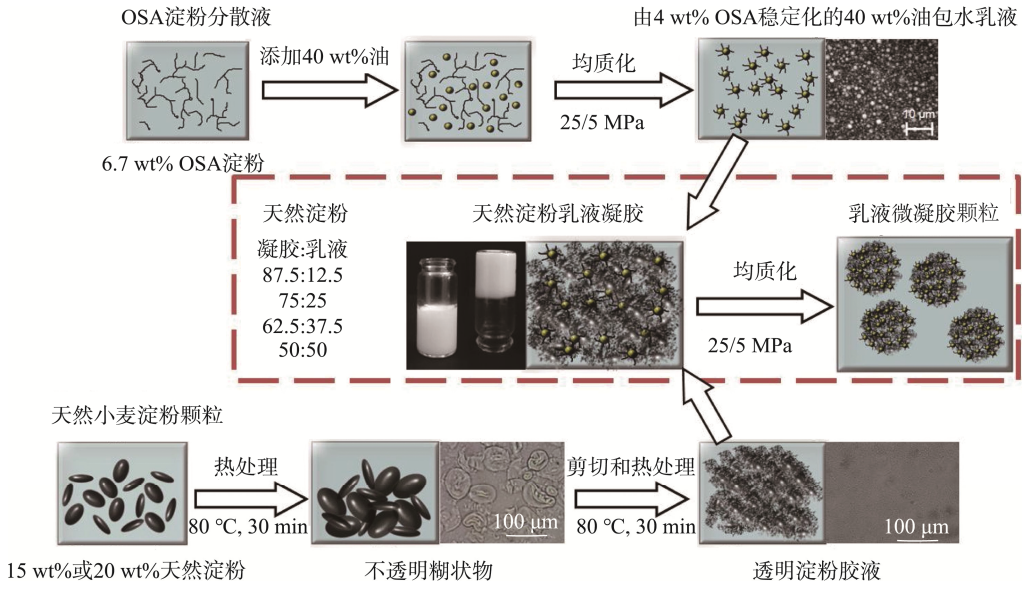


图 2 淀粉基乳液填充凝胶形成机制示意图[29]

Fig.2 Schematic diagram of the formation mechanism of starch-based emulsion-filled gel[29]

表 1 淀粉基乳液填充凝胶体系的构建

Table 1 Construction of starch-based lotion filled gel system

淀粉凝胶基质	乳化剂	主要制备方法	主要结构特点或应用	参考文献
天然小麦淀粉	OSA 淀粉	先制备 OSA 淀粉稳定乳液，再与热处理剪切后的天然淀粉凝胶混合	OSA 淀粉稳定液滴可作为活性填料，提高凝胶网络强度	[29]
马铃薯淀粉	OSA 淀粉	先制备 OSA 淀粉稳定乳液，再与马铃薯淀粉凝胶体系复合	油滴作为活性填料调控凝胶强度，并影响 NaCl 释放行为	[32]
马铃薯淀粉	乳清蛋白分离物	将乳清蛋白包覆油滴分散于糊化马铃薯淀粉基质中	淀粉浓度提高后，凝胶网络增强，并影响水分分布和脂质消化	[33]
OSA 改性大米淀粉	OSA 改性大米淀粉	以 OSA 改性大米淀粉同时作为乳化剂和凝胶基质，经一步热凝胶化形成乳液凝胶	油含量影响凝胶流变行为、微结构及油滴填充作用	[34]
OSA 改性大米淀粉	OSA 改性大米淀粉	调控凝胶化温度诱导淀粉基乳液凝胶形成	凝胶化温度影响流变行为、微结构及油滴-基质相互作用	[27]
豌豆淀粉	含有 0.5 wt%的乳液	采用反相凝胶化技术制备凝胶珠	可共同负载原花青素和姜黄素，适用于亲水性/脂溶性活性物质的保护释放	[30]
改性淀粉凝胶	OSA 酯化和臭氧氧化处理的蜡质米淀粉	通过 OSA 酯化、臭氧氧化与 Ca^{2+}诱导协同构建乳液凝胶网络	增强低温稳定性，形成更致密交联网络	[35]
玉米淀粉纳米颗粒稳定的 Pickering 乳液凝胶和紫玉米芯花青素修饰的玉米淀粉纳米颗粒稳定的 Pickering 乳液凝胶	玉米淀粉纳米颗粒；紫玉米芯花青素修饰的玉米淀粉纳米颗粒	溶剂置换法制备花色苷改性淀粉纳米颗粒，再稳定 O/W Pickering 乳液凝胶	通过提高颗粒疏水性、连续相黏度和界面层稳定性改善乳液凝胶稳定性	[36]
OSA 改性淀粉	OSA 改性淀粉	比较颗粒态淀粉与分子态淀粉转化形成的不同凝胶网络结构	致密凝胶网络增强姜黄素保护与控释行为	[37]
OSA 改性高直链玉米淀粉	OSA 改性高直链玉米淀粉	OSA 改性结合微波辅助糊化构建乳液凝胶	油滴作为活性填料增强基质，适合清洁标签结构化食品设计	[2]

2.2　淀粉基乳液填充凝胶形成的影响因素

2.2.1　油相特性

不同油相在脂肪酸链长、饱和度、极性、黏度及分子构象等方面存在差异, 这些因素会进一步影响乳化剂在油水界面的吸附行为、界面膜稳定性以及油滴在凝胶体系中的填充作用[39]。LI 等[40]探讨了 6 种不同类型油对乳液填充凝胶流变性能的影响, 研究发现, 油极性的增加会导致油滴和乳化剂之间的疏水相互作用减弱, 使乳化剂在油滴界面上的吸附降低, 形成较弱的界面网络; 而含有长链脂肪酸的油相具有更高的黏度, 在凝胶基质网络中充当活性填料, 其流变行为表现为更高的弹性模量。

2.2.2　液滴粒径

油滴尺寸也是决定乳液填充凝胶结构的重要因素。较小的乳液液滴粒径有利于增大油相总表面积, 从而增强油相与凝胶基质之间的相互作用, 提高乳液填充凝胶的凝胶强度。乳液填充凝胶的油滴尺寸主要受其在形成过程中乳液特性的影响, 淀粉乳液通常以淀粉颗粒或淀粉分子为稳定剂或乳化剂。其中, 在基于淀粉颗粒稳定的 Pickering 乳液构建乳液填充凝胶体系研究中, 对其粒径的调控方法主要集中在 3 方面: (1)降低颗粒稳定剂尺寸以减少液滴粒径, 如淀粉纳米颗粒稳定剂; (2)通过改善淀粉颗粒的疏水改性方式提高淀粉乳化性, 如酯化和交联双重改性; (3)将淀粉和非淀粉成分混合协同稳定油滴, 如淀粉颗粒与表面活性剂或纤维素纳米晶共稳定体系[5,36]。此外, 与颗粒稳定剂相比, 淀粉分子乳化剂在乳液制备中具有更高的移动性, 其可以更快地吸附到油滴表面降低界面张力, 而形成更小的粒径[41]。

2.2.3　油含量

油含量对乳液填充凝胶性质的影响与油滴在网络中的填充行为密切相关。通常情况下, 对于具有活性填充作用的液滴, 乳液填充凝胶的凝胶强度随油含量的增加而增加; 而对于具有非活性填料的乳液填充凝胶, 其凝胶强度随油含量的增加而降低。此外, 液滴在体系中的填充效应随油含量的不同而改变在较低油含量下, 由于液滴和凝胶分子的分散性较高, 液滴和凝胶基质之间存在较低的亲和力, 表现为非活性填充; 在中等或高油含量下, 油滴和凝胶基质的聚集程度增加, 表现为活性填充; 而在更高油含量下, 由于乳化系统更加不均匀, 凝胶网络相互作用变弱, 可能再次表现为破坏行为[34]。

2.2.4　乳化剂类型

乳化剂是影响淀粉基乳液填充凝胶形成的重要界面调控因素, 其作用不仅体现在维持乳液分散稳定性, 还会通过改变油滴表面的吸附层结构、界面电荷及油滴与凝胶基质之间的亲和性, 进一步决定油滴在凝胶网络中表现为活性填料还是非活性填料[42]。在淀粉基乳液体系中, 常用乳化剂主要包括改性淀粉、淀粉颗粒、蛋白质及小分子表面活性剂等。其中, OSA 淀粉因同时具有亲水多糖链段和疏水基团, 可在油水界面快速吸附并降低界面张力, 是目前淀粉基乳液填充凝胶中应用较多的一类乳化剂; 此外, 其还可兼作凝胶基质组分, 在体系形成过程中参与三维网络构建, 从而实现乳化与凝胶化功能的协同[29,34]。与改性淀粉相比, 蛋白质类乳化剂能够在油滴表面形成具有一定黏弹性的界面膜, 不同蛋白质因分子构象、带电特性和界面吸附能力不同, 会使乳液凝胶表现出差异明显的微观结构和力学性质[43]。已有研究表明, 界面层组成的变化能够显著改变油滴与连续相凝胶网络之间的相互作用, 进而影响乳液填充凝胶的流变行为、质构特性及结构稳定性[42–43]。

2.2.5　乳化剂浓度

当乳化剂添加量不足时, 油滴表面难以形成完整连续的吸附层, 油滴易在均质、加热或储藏过程中发生聚并, 导致体系粒径增大、结构均匀性下降, 不利于后续凝胶网络的稳定形成[42]。随着乳化剂浓度增加, 界面覆盖程度提高, 油滴粒径通常减小, 乳液稳定性增强, 油滴在凝胶基质中的分散状态也更加均一。然而, 乳化剂并非添加量越高越好; 当其浓度过高时, 体系中未吸附的游离乳化剂可能改变连续相中淀粉分子的缔合行为, 或削弱油滴与凝胶基质之间的有效耦合, 使油滴由促进网络增强的活性填料转变为对凝胶结构贡献有限的非活性填料[42]。CHEN 等[42]研究发现, 额外乳化剂的引入可明显改变油滴在乳液凝胶中的填充作用, 并进一步影响凝胶网络结构及功能活性物质的稳定性, 说明乳化剂类型和用量均会通过界面层性质间接调控乳液填充凝胶的最终性能。

2.2.6　淀粉凝胶基质组成与浓度

不同来源或不同结构特征的淀粉在直链淀粉含量、支链长度分布、分子量及糊化行为等方面存在差异, 其会进一步影响淀粉分子在凝胶形成过程中的溶出、重排和缔合方式, 从而改变乳液填充凝胶的网络致密性及力学强度[1,24]。例如, 以酶解大米淀粉制备的低分子量淀粉作为凝胶基质时, 可获得具有较好顺滑口感的乳液填充凝胶, 并在低脂蛋糕、沙拉酱、黄油替代物和搅拌型酸奶等食品中表现出一定应用潜力[17]。此外, 在加热过程中, 淀粉结构发生剧烈变化, 包括颗粒吸水膨胀、分子浸出、晶体结构熔解和颗粒崩解等。通过控制凝胶条件也可以有效调控淀粉基乳液填充凝胶的性能。其中, 在低胶凝温度下, 淀粉分子从颗粒中浸出, 通过连接淀粉颗粒和/或油滴形成乳液填充凝胶网络结构。随着胶凝温度的增加, 淀粉糊化程度增加, 淀粉颗粒吸水膨胀填充体积, 使体系凝胶强度增加, 而在更高温度下, 淀粉颗粒逐渐崩解为分散的淀粉分子, 导致乳液填充凝胶的凝胶强度降低[27]。

随着淀粉浓度增加, 体系中可参与分子缔合和网络构建的淀粉链数量增多, 分子间作用位点相应增加, 有利

于形成更加连续、致密的三维网络结构，从而提高乳液填充凝胶的凝胶强度、储能模量和持水能力[2]。不过，淀粉浓度过高时，体系黏度会明显上升，可能影响均质过程中油滴的充分分散，并增加局部聚集或结构不均一的可能性，因此其优化应兼顾网络增强与乳液分散稳定之间的平衡[2]。这表明，通过调节淀粉基质的组成和分子特征，可实现对乳液填充凝胶质构和功能特性的定向设计。

2.2.7 凝胶基质组分间相互作用

除淀粉自身结构外，蛋白质、明胶等外源组分的引入也会显著改变凝胶基质的网络结构，进而调控乳液填充凝胶体系的功能特性。蛋白质可通过静电作用、氢键作用或疏水相互作用与淀粉共同构建复合网络，同时其在油水界面的吸附还会改变油滴与连续相之间的界面结合状态[38]。ASYRUL-IZHAR 等[38]研究发现，明胶与改性玉米淀粉之间的静电相互作用可促进乳液凝胶形成更加均匀的网络结构，并提高体系的硬度和稳定性。

除蛋白质外，多酚等小分子活性成分也会通过与淀粉发生相互作用，进一步影响凝胶基质的形成及其功能特性。LI 等[44]研究表明，茶多酚与不同来源淀粉复合后，可通过非共价作用改变淀粉的糊化行为、分子排列和结构特征。ZHANG 等[45]进一步指出，多酚与淀粉之间既可形成包合复合物，也可形成非包合复合物，不同结合方式会对淀粉结构和消化特性产生差异化影响。在乳液填充凝胶体系中，这类相互作用可能进一步改变连续相网络的致密程度、油滴固定能力及体系稳定性。

3 淀粉基乳液填充凝胶的应用

3.1 在功能因子递送中的应用

水凝胶具有良好的结构稳定性和机械支撑作用，但其亲水性网络通常不利于脂溶性功能因子的高效负载与稳定递送。相比之下，乳液体系能够为疏水性活性物质提供油相溶解环境，是改善脂溶性功能因子分散性、稳定性和消化吸收行为的常用策略[30,46]。基于油滴嵌入凝胶基质的独特结构，乳液填充凝胶同时结合了乳液和水凝胶的优势，有望实现高效递送脂溶性功能因子。该体系对脂溶性功能因子的控释性能高度依赖于其液滴结构和凝胶基质结构[6,47]。MUN 等[6]将淀粉基乳液填充凝胶作为 β-胡萝卜素的递送载体，并对比了该体系与传统蛋白乳液和淀粉水凝胶的递送效果差异，研究表明，由于油滴对 β-胡萝卜素的溶解及淀粉凝胶基质对 β-胡萝卜素的保护作用，封装在淀粉基乳液填充凝胶中的 β-胡萝卜素的生物利用度明显高于乳液和淀粉水凝胶。这归因于淀粉凝胶基质能够在胃肠消化过程中对乳化油滴起到结构保护作用，从而改善脂溶性功能因子的释放行为。

近年来，淀粉基乳液填充凝胶已被用于 β-胡萝卜素、姜黄素、原花青素以及益生菌等功能因子的递送[6,30,48]。淀粉基乳液填充凝胶递送功能因子的示意图如图 3 所示[37]。相关研究表明，淀粉凝胶基质不仅能够在口腔和胃消化阶段限制油滴的快速破坏，还可通过调控淀粉浓度、直链淀粉含量、淀粉颗粒状态及凝胶化方式等因素，改变凝胶网络结构和消化响应特性，从而实现功能因子的保护、控释和肠道递送[30,48–49]。淀粉基乳液填充凝胶及相关体系在功能因子递送中的应用见表 2。

淀粉存在状态(颗粒态/分子态)对淀粉基乳液填充凝胶的递送性能影响显著。虽然由淀粉颗粒和淀粉分子形成的乳液填充凝胶体系具有较高的硬度，但其凝胶网格较大、凝胶网络较弱导致其姜黄素控释行为较差，而当淀粉颗粒通过凝胶化完全分解成分散的淀粉分子时，可以获得柔软但网络致密的淀粉分子乳液填充凝胶，其对口腔和胃早期消化的侵蚀具有更强的抑制作用，从而将溶解在油中的姜黄素有效地输送到靶向器官肠道中[37]。随淀粉浓度的增加，淀粉基乳液填充凝胶形成致密网络，该结构可以抑制消化液对凝胶结构破坏，从而延缓油滴消化[33]。CHEN 等[48]将益生菌溶于油相中，研究了直链淀粉含量对

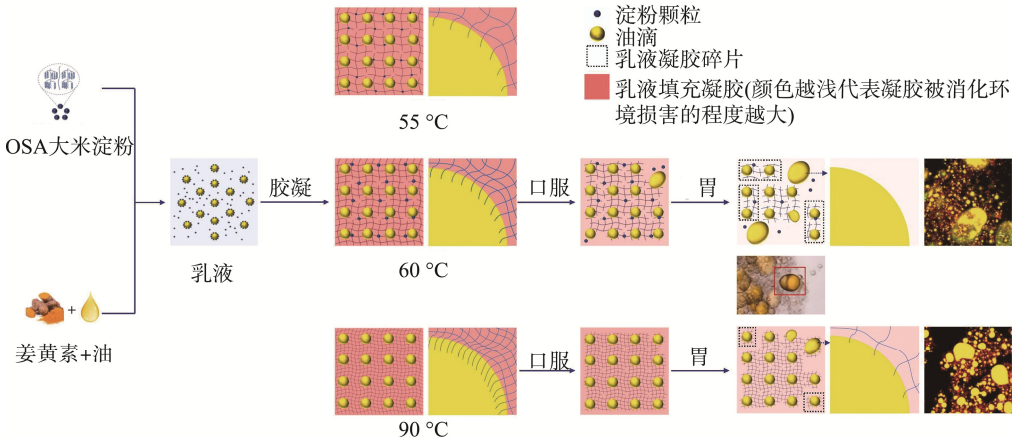


图 3 淀粉基乳液填充凝胶递送功能因子的示意图[37]

Fig.3 Schematic diagram of the functional factors for the delivery of starch-based emulsion-filled gels[37]

表 2　淀粉基乳液填充凝胶在功能因子递送中的应用

Table 2　Application of starch-based emulsion-filled gel in functional factor delivery

年份	递送体系	递送对象	主要设计思路	主要递送效果	参考文献
2015	淀粉基填充水凝胶	β-胡萝卜素	将 β-胡萝卜素溶解于油相, 并将乳化油滴嵌入淀粉水凝胶基质	油滴为 β-胡萝卜素提供脂质溶解环境, 淀粉凝胶基质进一步改善其消化过程中的生物可及性	[6]
2023	淀粉基乳液凝胶珠	原花青素和姜黄素	采用反相乳液凝胶化技术制备淀粉基乳液凝胶珠, 实现原花青素和姜黄素共同负载	提高淀粉浓度可增强凝胶珠硬度和胃环境稳定性, 降低原花青素和姜黄素在胃阶段的提前释放	[30]
2023	不同结构玉米淀粉凝胶负载姜黄素纳米乳液	姜黄素	利用不同直链淀粉含量的玉米淀粉构建凝胶体系, 考察凝胶结构对姜黄素消化的影响	不同淀粉凝胶结构影响姜黄素在胃肠消化过程中的释放和生物可及性, 说明凝胶基质结构是调控递送行为的重要因素	[49]
2023	淀粉复配填充水凝胶	β-胡萝卜素	通过不同粒径淀粉复配调节凝胶强度和结构稳定性	淀粉复配可改善 β-胡萝卜素的热稳定性和体外消化过程中的保留率	[50]
2024	乳清蛋白/壳聚糖/马铃薯淀粉乳液凝胶	β-胡萝卜素	在乳清蛋白稳定乳液基础上引入壳聚糖和马铃薯淀粉凝胶网络	壳聚糖增强凝胶网络结构并调节脂质消化行为, 有助于提高 β-胡萝卜素生物可及性	[51]
2024	高直链玉米淀粉热可逆乳液凝胶	姜黄素	以高直链玉米淀粉构建热可逆凝胶网络, 并以姜黄素作为模型活性物质	该体系具有热可逆溶胶-凝胶转变特征, 并可实现姜黄素包埋, 为热响应型淀粉乳液凝胶递送体系提供参考	[52]
2025	颗粒态/分子态转化调控的淀粉基乳液填充凝胶	姜黄素	比较颗粒态淀粉与分子态淀粉形成的不同凝胶网络结构	颗粒态/分子态淀粉结构转化可改变凝胶网络及油滴-基质相互作用, 从而增强姜黄素在消化过程中的保护与控释效果	[37]
2026	不同直链淀粉含量的淀粉基乳液凝胶	益生菌	通过调控直链淀粉含量改变乳液凝胶结构和物理稳定性	淀粉基乳液凝胶可提高益生菌在热处理和模拟胃肠消化过程中的存活率, 显示出活性微生物递送潜力	[48]

淀粉基乳液填充凝胶的益生菌递送性能, 结果显示, 高直链淀粉含量体系在热处理和模拟体外消化过程中对益生菌表现出优异的保护性能。BU 等[30]进一步构建了同时负载花青素(水溶性功能因子)和姜黄素(脂溶性功能因子)的淀粉基乳液填充凝胶珠, 研究发现, 通过调节淀粉浓度可有效提高淀粉基乳液填充凝胶珠在胃消化阶段的稳定性和对功能因子的控释效果, 当将淀粉浓度从 9.1%增加到 33.3%, 淀粉基乳液填充凝胶珠的硬度增加了 8.8 倍, 所负载的花青素和姜黄素在胃中的释放率分别从 68.32%和 7.00%降低到 16.66%和 0.45%, 表明可以更大程度地保护功能因子在肠中释放, 并提出其是功能因子的理想递送载体。

3.2　作为脂肪组织替代物

肉制品由于富含高生物价值蛋白、脂溶性维生素等营养素和优良的感官品质深受消费者青睐, 该类产品中通常含有 30%~50%动物脂肪[53]。脂肪不仅是构成肉制品质地和口感的基础, 同时也是亲脂性风味物质和功能成分的重要载体。然而, 动物脂肪中的饱和脂肪酸与胆固醇含量高达 40%~60%, 过量摄入不仅会导致低密度脂蛋白胆固醇升高, 增加动脉粥样硬化风险, 还可能扰乱脂质代谢引发全身性的健康问题[53–54]。动物脂肪组织由结缔组织三维网络包裹脂肪细胞构成[11–12]。在该网络中, 胶原蛋白通过自组装形成三螺旋结构为体系提供刚性支撑, 这也是脂肪组织呈现结构稳定性和高弹性的基础[17,55]。脂肪细胞内的脂质颗粒聚集成簇状聚集体, 使动物脂肪同时表现出一定的塑性行为[8]。

传统上, 具有三维分子网络的多糖和蛋白质水凝胶用以模拟动物脂肪, 但体系内缺失脂质成分导致食品风味和功能性缺乏[10,56]。富含不饱和脂肪酸的植物油是脂肪组织替代物的理想原料[12,57–58]。在植物基肉制品中常以植物油替代动物脂肪, 但导致体系丧失弹塑性、液态油难以保留在食物基质内等。因此, 设计更接近动物脂肪组织理化特性、功能属性和感官体验的新型脂肪替代物已成为食品工业的重要研究内容之一[59]。基于油滴嵌入凝胶基质网络的结构, 乳液凝胶呈现“类脂肪组织”的结构特点, 其有望在表现出相似宏观属性的同时拥有更健康的脂肪酸谱, 且由于含凝胶相而呈现低热量[1,8]。通过乳液凝胶构建凝胶分子网络包裹油滴的结构化油脂体系在动物脂肪模拟领域富有前景[60–61]。

脂肪替代物属于软固体物质, 其在口服过程中需经历入口、接触、咀嚼到吞咽的复杂过程。口腔加工特性是脂肪替代物研究的重要落脚点。目前, 关于乳液填充凝胶的研究主要集中于体系构建、微观结构、理化特性等, 较少研究专注于其口腔行为[62–63]。脂肪在咀嚼作用下由相对完整的几何形态逐渐转变为微粒与唾液混合的近似流体状态的食团, 此时口感感知很大程度上受食团与舌头、上颚等口腔组织间相互摩擦的影响[64–65]。因此, 脂肪替代物的摩擦行为是决定其感官表现的关键因素[62,66]。相比于其

他食物基质，油膜的润滑作用占主导地位，但乳液填充凝胶中凝胶基质对油滴的包裹作用往往会降低其感官品质[18,60]。在大豆分离蛋白-魔芋葡甘露聚糖复合乳液填充凝胶脂肪替代物中，添加 7%魔芋葡甘露聚糖可使乳液填充凝胶的硬度和咀嚼性分别提升 29.62%和 49.57%，这主要归因于多糖形成的刚性骨架及其通过诱导蛋白聚集对网络结构的强化作用[12]。然而，这种强化的凝胶网络虽然提升了体系的质地品质，却阻碍了咀嚼过程中油相释放，导致该样品的油性和多汁性评分较低。如何平衡凝胶体系的结构强度与口服油脂释放性能是乳液填充凝胶脂肪替代物研究的一项挑战[67]。

口腔唾液中含淀粉酶等化学成分，可对淀粉成分水解破坏，该行为利于淀粉基乳液填充凝胶油滴在口腔加工过程中从体系内释放到口腔表面，从而形成润滑感。以乳清蛋白分离物为乳化剂和以淀粉为凝胶基质构建乳液填充凝胶，进行体外模拟口腔，添加淀粉酶可显著促进体系中油滴的聚结与释放，油脂在口腔中的释放量增加，可以提高体系的脂肪模拟感官特性[68]。而在以淀粉为乳化剂和以乳清分离蛋白为凝胶基质的乳液填充凝胶体系中，由于蛋白质在口腔加工中生化作用惰性，其凝胶基质网络结构抑制淀粉酶对油滴表面淀粉的接触与消化[69–70]。HU 等[18]分别以乳清分离蛋白和淀粉为乳化剂、以结冷胶为凝胶基质制备乳液填充凝胶，结果表明使用淀粉乳化剂的体系在口腔中具有较高的油脂释放量和增强的油性口感。淀粉基乳液填充凝胶在脂肪替代领域呈现良好的应用前景。

4 结束语

淀粉具有价格低廉、无抗原性、生物相容性好和结构相对稳定等优点。基于油滴嵌入淀粉凝胶基质的结构，淀粉基乳液填充凝胶在动物脂肪替代、功能因子递送等方面已显现出巨大优势。然而，目前对淀粉基乳液填充凝胶的研究有待进一步完善，如基于淀粉乳液填充凝胶的低脂肉制品贮藏期、体内代谢行为等，且目前关于乳液填充凝胶的应用大部分研究仍处于实验室阶段，在实际生产中应用较少。未来可从以下方面加强研究：(1)新型淀粉基乳液填充凝胶体系的开发与设计；(2)调控因素对体系结构-理化特性-功能性内在关联研究；(3)淀粉基乳液填充凝胶的产业化研究。相关研究的开展有望形成更多形态和性质优异的体系，并为定向构建乳液填充凝胶提供理论依据，对于丰富功能性食品种类，满足复杂的食品体系、工业应用和不同消费者人群的需求具有重要意义。

参考文献

[1] GUO J, CUI L, MENG Z. Oleogels/emulsion gels as novel saturated fat replacers in meat products: A review [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 137: 108313.

[2] JIANG C, JIN D, CHEN Z, *et al*. Emulsion gels based on OSA modified high amylose maize starch: Formation, interfacial properties, and stability [J]. Food Hydrocolloids, 2026, 172: 111918.

[3] DICKINSON E. Emulsion gels: The structuring of soft solids with protein-stabilized oil droplets [J]. Food Hydrocolloids, 2012, 28(1): 224–241.

[4] ZHANG W, LIAO J, QI J. Modulating limonin release via pectin fine structure in Ca^{2+}-citrus pectin emulsion gels [J]. Food Research International, 2026, 223: 117745.

[5] XU J, LIU J, LI Y, *et al*. Review on the preparation, properties, application, and future trends of starch ester-based Pickering emulsions [J]. Food Hydrocolloids, 2026, 171: 111851.

[6] MUN S, KIM Y, MCCLEMENTS DJ. Control of *β*-carotene bioaccessibility using starch-based filled hydrogels [J]. Food Chemistry, 2015, 173: 454–461.

[7] BARIK M, DEKA SC, DAS AB. Curcuminoids loaded eutectic starch emulsion gel: Rheology, stability, *in-vitro* release behavior and cytotoxicity [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2025, 328: 147634.

[8] HOU W, LONG J, ZHANG C, *et al*. Effect of *β*-sitosterol and oil phase on gel properties, microstructure and sensory characteristics of pea protein/carrageenan emulsion gels as solid fat substitutes [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 160: 110751.

[9] WANG Y, YIU CC, KIM W, *et al*. Emulsion gels of oil encapsulated in double polysaccharide networks as animal fat analogues [J]. Food Hydrocolloids, 2026, 171: 111807.

[10] CZAPALAY E, MARANGONI A. Functional properties of oleogels and emulsion gels as adipose tissue mimetics [J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 153: 104753.

[11] LEE J, WI G, CHOI M. The rheological properties and stability of gelled emulsions applying to *κ*-carrageenan and methyl cellulose as an animal fat replacement [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 136: 108243.

[12] REN Y, WEI L, YOONG JH, *et al*. Effect of variation in basic emulsion structure and polysaccharide content on the physicochemical properties and structure of composite-based emulsion gels as cube fat mimetics [J]. Food Chemistry, 2024, 434: 137450.

[13] JIN D, WANG X, LI Y, *et al*. Changes in structure, digestion, and curcumin release properties of starch constructed by protein fibrils-OSA starch interactions [J]. Food Chemistry, 2026, 512: 148859.

[14] ZHANG J, WU X. Differential emulsion stabilization mechanisms of soluble *VS.* insoluble acetylated starches: Insights from molecular architecture and stability [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2026, 111: 104567.

[15] LI S, HUANG L, ZHANG B, *et al*. Fabrication and characterization of starch/zein nanocomposites with pH-responsive emulsion behavior [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 112: 106341.

[16] WANG X, WANG X, XIA S, *et al*. Modulating the microstructure of acid-tolerant W1/O/W2 high internal phase double emulsions by OSA starch to alter sodium salt distribution and enhance saltiness perception [J]. Food Hydrocolloids, 2026, 176: 112582.

[17] ZHANG X, CHEN D, ZHAO Z, *et al*. Rheological and textural properties of emulsion-filled gel based on enzymatically hydrolyzed rice starch [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 126: 107463.

[18] HU X, KARTHIK P, CHEN J. Enhanced oral oil release and mouthfeel perception of starch emulsion gels [J]. Food Research International, 2021, 144: 110356.

[19] WANG X, XIA S, HAYAT K, *et al*. Interface behavior, competitive substitution, and saltiness perception of switchable water-in-oil high internal phase emulsions-based delivery carrier for sodium salt regulated by OSA starch [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 164: 111162.

[20] WEI D, RUI W, JIE G, *et al*. Encapsulation of resveratrol by Pickering emulsion stabilized by *Pueraria lobata* nano-starch [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2026, 337: 149557.

[21] LI S, LI C, YANG Y, *et al*. Starch granules as Pickering emulsifiers: Role of octenylsuccinylation and particle size [J]. Food Chemistry, 2019, 283: 437–444.

[22] PAWASE P, PATHARE A, BASHIR O, *et al*. Physical, chemical, and nano-enabled modifications of starch for sustainable food packaging films: recent trends, challenges, and prospects [J]. Carbohydrate Polymer Technologies and Applications, 2025, 11: 100986.

[23] LIU M, WU Y, OUANG Y. Insights into the properties of maize starch nanoparticles impacting the stability of Pickering emulsions [J]. Food Bioscience, 2025, 73: 107743.

[24] SHU J, MCCLEMENTS DJ, LUO S, *et al*. Advances of biopolymer-based emulsion gels: Fabrication, design, and application [J]. Trends in Food Science & Technology, 2025, 165: 105335.

[25] GENG D, TANG N, ZHANG N, *et al*. Effect of starch chain structures on the order, strength, and digestibility of retrograded starch structures: A review [J]. Carbohydrate Polymers, 2026, 375: 124796.

[26] LI L, JI H, WANG Y, *et al*. The insight in wheat starch entanglement behavior and its effect on starch gel in aqueous solution [J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 368: 124004.

[27] ZHAO X, LI D, WANG L, *et al*. Role of gelation temperature in rheological behavior and microstructure of high elastic starch-based emulsion-filled gel [J]. Food hydrocolloids, 2023, 135: 108208.

[28] FARJAMI T, MADADLOU A. An overview on preparation of emulsion-filled gels and emulsion particulate gels [J]. Trends in Food Science & Technology, 2019, 86: 85–94.

[29] TORRES O, MERCADO TN, MURRAY B, *et al*. Novel starch based emulsion gels and emulsion microgel particles: Design, structure and rheology [J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 178: 86–94.

[30] BU X, GUAN M, DAI L, *et al*. Fabrication of starch-based emulsion gel beads by an inverse gelation technique for loading proanthocyanidin and curcumin [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 137: 108336.

[31] GONG Y, XIAO S, YAO Z, *et al*. Factors and modification techniques enhancing starch gel structure and their applications in foods: A review [J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 102045.

[32] ZHANG YH, YANG H, ZHENG HX, *et al*. Physical properties and salt release of potato starch-based emulsion gels with OSA starch-stabilized oil droplets [J]. LWT, 2021, 141: 110929.

[33] HU Y, LI C, TAN Y, *et al*. Insight of rheology, water distribution and in vitro digestive behavior of starch based-emulsion gel: Impact of potato starch concentration [J]. Food Hydrocolloids, 2022, 132: 107859.

[34] ZHAO X, LI D, WANG L, *et al*. Rheological properties and microstructure of a novel starch-based emulsion gel produced by one-step emulsion gelation: Effect of oil content [J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 281: 119061.

[35] DU M, CHEN Y, CHEN L, *et al*. Synthesis of a novel starch-based emulsion gel with remarkable low-temperature stability via esterification, ozone-oxidation and ion induction [J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 352: 123165.

[36] CHENG G, LIANG Z, JIN W, *et al*. Enhanced emulsifying properties of corn starch nanoparticles modified with purple corn cob anthocyanins as a Pickering emulsion gel stabilizer [J]. Current Research in Food Science, 2025, 11: 101252.

[37] WU X, WEI S, ZHAO X, *et al*. Enhanced curcumin delivery behavior of starch-based emulsion-filled gel by granular and molecular starch transformation: From gel formation to controlled release [J]. Carbohydrate Polymers, 2025, 367: 124014.

[38] ASYRUL-IZHAR AB, BAKAR J, SAZILI AQ, *et al*. Emulsion gels formed by electrostatic interaction of gelatine and modified corn starch via pH adjustments: Potential fat replacers in meat products [J]. Gels, 2023, 9(1): 50.

[39] CHEN Y, CAO Q, WANG P, *et al.* Influence of the oil phase type and volume fraction on the properties of plant-based creams based on pea protein-pectin emulsion gels [J]. Current Research in Food Science, 2025, 11: 101258.

[40] LI S, LI P, WANG J, *et al*. The effect of oil types on the droplet shape and rheology of emulsion gels stabilized with camellia saponin [J]. Fuel, 2025, 386: 134239.

[41] HISFAZILAH S, WAHLGREN M, RAYNER M, *et al*. A comparison of emulsion stability for different OSA-modified waxy maize emulsifiers: Granules, dissolved starch, and non-solvent precipitates [J]. PLoS One, 2019, 14(2): e0210690.

[42] CHEN H, MAO L, HOU Z, *et al*. Roles of additional emulsifiers in the structures of emulsion gels and stability of vitamin E [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 99: 105372.

[43] LU Y, ZHANG Y, YUAN F, *et al*. Emulsion gels with different proteins at the interface: Structures and delivery functionality [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 116: 106637.

[44] LI JW, SHEN MY, XIAO WH, *et al*. Regulating the physicochemical and structural properties of different starches by complexation with tea polyphenols [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 144: 108836.

[45] ZHANG QZ, FAN SY, XIE HJ, *et al*. Polyphenols from pigmented quinoa as potential modulators of maize starch digestion: Role of the starch-polyphenol inclusion and non-inclusion complexes [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 144: 108975.

[46] 岳庆, 史文鹏, 张春月, 等. 食源性活性物质稳态化及靶向递载体的研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(19): 272–286.
YUE Q, SHI WP, ZHANG CY, *et al*. Research progress on stabilization and targeted delivery carriers of food-derived active substances [J]. Food Science, 2024, 45(19): 272–286.

[47] LI R, XUE H, GAO B, *et al*. Physicochemical properties and digestibility of thermally induced ovalbumin-oil emulsion gels: Effect of interfacial film type and oil droplets size [J]. Food Chemistry, 2022, 131: 107747.

[48] CHEN Z, GU Z, CHENG L, *et al.* Starch-based emulsion gels enhanced probiotic viability: Effect of amylose content [J]. Food Hydrocolloids, 2026, 178: 112620.

[49] QAZI HJ, YE A, ACEVEDO-FANI A, *et al*. The impact of differently

structured starch gels on the gastrointestinal fate of a curcumin-containing nanoemulsion [J]. Food & Function, 2023, 14: 7924–7937.

[50] KIM D, JUNG YK, RHO SJ, *et al*. Improved stability and in vitro bioavailability of *β*-carotene in filled hydrogel prepared from starch blends with different granule sizes [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 139: 108546.

[51] HU Y, WANG L, MCClEMENTS DJ. Design, characterization and digestibility of *β*-carotene-loaded emulsion system stabilized by whey protein with chitosan and potato starch addition [J]. Food Chemistry, 2024, 440: 138131.

[52] YANG Z, HE X, SONG Y, *et al*. Fabrication and characterization of novel curcumin-loaded thermoreversible high amylose maize starch emulsion gel [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 280: 136173.

[53] YAO W, HUANG X, LI C, *et al*. Underlying the effect of soybean oil concentration on the gelling properties of myofibrillar protein-based emulsion gels: Perspective on interfacial adsorption, rheological properties and protein conformation [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 162: 110935.

[54] ZHU P, SHEN Y, WU F, *et al*. Fabrication of amorphous pea starch-whey protein emulsion gels for synergistic stabilization, nutrient delivery, and solid fat replacement [J]. Food Chemistry, 2025, 496(3): 146902.

[55] LI X, XU Z, XU X, *et al*. Carbohydrate-based fat mimetics: A focus on fat-mimicking mechanisms and a tribology perspective [J]. Trends in Food Science & Technology, 2025, 157: 104885.

[56] CHEN H, PAN S, REGENSTEIN JM, *et al*. Characteristics of composite gels composed of citrus insoluble nanofiber and amylose and their potential to be used as fat replacers [J]. Food Chemistry, 2023, 409: 135269.

[57] LEE S, JO K, KIM S, *et al*. Constructing stable emulsion gel from gelatin and sodium alginate as pork fat substitute: Emphasis on lipid digestion *in vitro* [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 160: 110739.

[58] 沈雪丽, 蒲媛媛, 曹亚楠, 等. 脂肪模拟物及其在食品中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(15): 351–359.
SHEN XL, PU YY, CAO YN, *et al*. Research progress on fat mimetics and their applications in food [J]. Food Science, 2024, 45(15): 351–359.

[59] LEE S, JO K, KIM S, *et al*. Exploring the potential of the agar-based emulsion gel as a pork fat substitute in sausage with a focus on the digestive behaviors of lipids and proteins *in vitro* [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 166: 111335.

[60] ZHU X, TU Y, ZHAO Y, *et al*. Emulsion gel-based fat replacers in meat products: Structured design, processing stability, oral lubricity/flavor perception, and digestive characteristics [J]. Food Chemistry, 2025, 495: 146589.

[61] ZHANG R, LIU J, CAO S, *et al*. Tailoring an egg white protein double network emulsion gel as a novel fat substitute for improving freeze-thaw stability of minced meat gel [J]. Food Hydrocolloids, 2024, 150: 109763.

[62] GRASBERGER K, HAMMERSHØJ M, CORREDIG M. Lupin protein-stabilized oil droplets contribute to structuring whey protein emulsion-filled gels [J]. Food Research International, 2024, 178: 113987.

[63] LIN Y, ROOS YH, MIAO S. Transglutaminase crosslinked fish gelatin emulsion gels: Structure, rheology behaviors, and delivery functionality [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 162: 111011.

[64] SUNGSINCHAI S, NIAMNUY C, WATTANAPAN P, *et al*. Texture modification technologies and their opportunities for the production of dysphagia foods: A review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2019, 18(6): 1898–1912.

[65] RIBES S, ARNAL M, TALENS P. Influence of food oral processing, bolus characteristics, and digestive conditions on the protein digestibility of turkey cold meat and fresh cheese [J]. Food Research International, 2023, 173: 113297.

[66] ZHANG Y, ZHANG R, LU Y, *et al*. Effect of simulated saliva on rheological and tribological properties of oleogel-in-water HIPEs during oral processing [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2024, 653: 1018–1027.

[67] FAROOQ U, SCHOLTEN E, DI MATTIA C, *et al*. Stability and tribological properties of oil-in-water emulsions stabilized with native corn starch and olive leaves phenolic extracts [J]. Food Hydrocolloids, 2025, 166: 111382.

[68] MUN S, MCCLEMENTS DJ. Influence of simulated in-mouth processing (size reduction and alpha-amylase addition) on lipid digestion and *β*-carotene bioaccessibility in starch-based filled hydrogels [J]. LWT, 2017, 80: 113–120.

[69] LIN Q, LIANG R, ZHONG F, *et al*. *In vivo* oral breakdown properties of whey protein gels containing OSA-modified-starch-stabilized emulsions: Impact of gel structure [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113: 106361.

[70] WEN Y, CHE QT, KIM HW, *et al*. Potato starch altered the rheological, printing, and melting properties of 3D-printable fat analogs based on inulin emulsion-filled gels [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 269: 118285.

(责任编辑: 安香玉 蔡世佳)