

乳清蛋白基凝胶的制备及应用研究进展

覃向林, 胡文梅, 韦际彬, 徐薇, 马廷鸿, 王星燕, 李宇亭, 陈山*

(广西大学轻工与食品工程学院, 广西南宁 530004)

摘要: 乳清蛋白因具有优异的功能特性、生物相容性和生物可降解性, 被广泛用作生物活性物质的递送系统。基于乳清蛋白的功能特性能够构建不同类型的凝胶用于封装活性物质, 实现缓释功能, 提高其稳定性和生物利用度, 利于构建蛋白质基递送系统和功能性食品的开发。文章介绍了乳清蛋白的组成、功能特性及影响凝胶特性的因素, 总结乳清蛋白基凝胶的类型, 包括热诱导凝胶、冷诱导凝胶、自组装和乳液凝胶, 同时概述其在食品领域的应用, 并对该研究领域有待解决的问题以及未来的研究方向进行展望, 为后续研究提高蛋白质基凝胶的稳定性和封装率, 拓展其在食品领域中的应用提供理论参考。

关键词: 乳清蛋白; 凝胶; 生物活性物质; 应用

文章编号: 1673-9078(2025)10-447-454

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.10.0937

Advances in the Preparation and Application of Whey Protein-based Gels

QIN Xianglin, HU Wenmei, WEI Jibin, XU Wei, MA Tinghong, WANG Xingyan, LI Yuting, CHEN Shan*

(College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: Whey protein is widely utilized as a delivery system for bioactive substances because of its excellent functional properties, biocompatibility, and biodegradability. Various types of gels can be formulated from whey protein to encapsulate active substances, thereby achieving their sustained release, improving their stability and bioavailability, and facilitating the development of protein-based delivery systems and functional gel products. This study was performed to evaluate the composition, functional properties, and factors affecting the gel properties of whey protein and summarize different types of whey protein-based gels, including heat-induced gel, cold-induced gel, self-assembled gel, and emulsion gel. Furthermore, the applications of these materials in the food industry are described, along with challenges to be addressed along with future research directions. These findings provide a theoretical reference for enhancing the stability and encapsulation efficiency of protein-based gel while expanding their application in the food industry.

Key words: whey protein; gel; bioactive substance; application

引文格式:

覃向林, 胡文梅, 韦际彬, 等. 乳清蛋白基凝胶的制备及应用研究进展[J]. 现代食品科技, 2025, 41(10): 447-454.

QIN Xianglin, HU Wenmei, WEI Jibin, et al. Advances in the preparation and application of whey protein-based gels [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(10): 447-454.

收稿日期: 2024-07-02; 修回日期: 2024-08-21; 接受日期: 2024-08-22

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(32260561); 广西中烟公司技术开发项目(0633-224042118E14); 广西大学大学生创新创业训练计划项目(202310593089)

作者简介: 覃向林(2001-), 男, 本科生, 研究方向: 生物大分子结构与功能化, E-mail: 2697629963@qq.com

通讯作者: 陈山(1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 糖类药物制备及其构效关系, E-mail: chenshan@gxu.edu.cn

凝胶是指亲水聚合物通过物理或化学交联形成的具有三维网络结构的软物质, 其凝胶网络能够有效包裹水分子和功能成分, 并提高这些功能成分的稳定性和生物利用度^[1]。近年来, 由天然聚合物如蛋白质制备的凝胶因其低毒性、生物相容性和生物可降解性而在功能食品中备受关注。多酚、类黄酮和类胡萝卜素等营养素以及益生菌对人体的健康有益, 因其具有各种生物活性和功能作用, 如抗氧化、抗炎和抗病毒等, 被广泛应用于食品、保健品和药品^[2,3]。然而, 大部分

活性物质易受环境因素（如温度、氧气、光等）的影响，在食品加工和胃肠道条件下不稳定，易发生降解，使得其生物利用度降低，限制了应用范围。大量研究表明，蛋白质基凝胶因其优异的功能特性和稳定的三维结构，能够封装活性物质并提高其稳定性和生物利用度。

乳清蛋白来源于牛奶，营养价值高，具有优异的凝胶性和乳化特性，展示出良好的生物相容性、可降解性和低毒性，常被用作构建不同类型的递送体系以优化功能成分的体内传递，是递送生物活性物质的理想材料^[4]。乳清蛋白属于球状蛋白，通过调控温度、离子强度和 pH 值等条件，能够形成具有不同特性的热诱导凝胶和冷诱导凝胶。这些凝胶具有的凝胶特性能够用于提高食品的弹性、硬度和咀嚼性，且具有的网络结构能够束缚水分子，使得凝胶具有较强的持水性，适用于改善和提高食品质地和稳定性。特别地，在半固体和固体食品中，能够不改变原本食品的质地和风味的前提下构建出不同特性的凝胶质地食品，拓展凝胶性食品的应用。此外，乳清蛋白含有多种官能团，能够与活性物质结合，且其具有的凝胶网络结构能够有效包裹和保护活性物质，适用于封装活性物质。另外，乳清蛋白在特定条件下可以自组装形成超分子结构，增强其凝胶性、乳化性和抗氧化特性，促进其应用^[5]。乳清蛋白因其乳化性和凝胶性，能够形成乳液凝胶，可以同时包埋亲水和疏水性活性物质，以提高活性物质的稳定性和生物利用度。因此，基于乳清蛋白的结构特性和优异的功能特性，能够通过调节形成凝胶的因素从而构建出优良的凝胶载体，促进功能性食品的开发。

由此可见，乳清蛋白基凝胶是生物活性物质的理想载体，然而，目前讨论主要集中在论述乳清蛋白的功能特性及应用，对基于乳清蛋白功能特性构建的载体类型尚待综述。因此，文章介绍了乳清蛋白的组成、功能特性和其凝胶形成的影响因素，重点论述了乳清蛋白基凝胶用于生物活性物质的递送类型，并总结其在食品方面的应用。同时探讨和展望了乳清蛋白基凝胶的应用前景，以期为蛋白质基凝胶的设计和应用提供一定的理论参考。

1 乳清蛋白的概述

1.1 乳清蛋白的组成和功能特性

乳清蛋白约占牛奶总蛋白的 20%，是奶酪加工的副产品，具有球状结构，主要成分为 β -乳球蛋白、 α -乳清蛋白、牛血清白蛋白等^[6]。其中， β -乳球蛋白是乳清蛋白的主要成分，具有类似于脂质运载蛋白的结构，

能够结合和输送疏水物质，适用于疏水性的活性物质载体^[7]。乳清蛋白主要的产品是乳清分离蛋白和乳清浓缩蛋白，其具有优异的凝胶、乳化和发泡特性，被广泛应用于食品工业中^[8]。其中，凝胶化是最重要的功能特性之一，通过将其加热至变性温度以上，蛋白质结构部分或完全展开后聚集，形成具有三维网络的凝胶^[9]。乳清蛋白凝胶因具有生物相容性、生物可降解性和低毒性等特性，被广泛应用于食品工业、生物医药和化妆品等领域。此外，乳清蛋白凝胶具有三维网络结构，可以包埋活性物质，保护其免受外界因素的影响，起到控释的作用，从而增强了活性物质的稳定性和生物利用度^[10,11]。

1.2 影响乳清蛋白凝胶的因素

乳清蛋白凝胶因其凝胶特性而被广泛应用，其凝胶化受加热条件（温度、加热速率和加工时间）和环境条件（pH 值、离子强度和蛋白浓度）以及其他食品成分的相互作用的影响。不同条件下形成凝胶的凝胶特性有所不同，通过选择适宜的凝胶形成条件，构建不同特性活性物质所需的递送系统，拓展乳清蛋白凝胶的应用。因此，下文概述了影响乳清蛋白凝胶的主要因素。

1.2.1 温度

乳清蛋白凝胶主要通过热处理（通常加热至乳清蛋白的变性温度以上）改变蛋白构象，蛋白质分子结构展开，并聚合形成乳清蛋白聚集体。乳清蛋白聚集体的形成是乳清蛋白凝胶化的基础。将乳清蛋白溶液加热至 70 °C 以上（溶液为中性条件），蛋白质分子结构展开，暴露出疏水基团和巯基，分子间通过共价键和非共价相互作用形成凝胶，这种类型的凝胶称之为热诱导凝胶^[12]。此外，在乳清蛋白聚集体的基础上，将其冷却至室温后调节 pH 值以达到蛋白质的等电点（酸诱导的冷凝胶化）或加入盐离子（盐诱导的冷凝胶化），从而降低蛋白质分子间的排斥力产生交联，这种类型的凝胶称之为冷诱导凝胶^[13]。Martin 等^[14]研究了不同加热条件（轻度、中度和重度）对乳清蛋白凝胶的影响，发现经重度处理（80 °C，长时间加热和 pH 值 2.0）后乳清蛋白形成凝胶速度最快，其次是中度条件（85 °C，3 h 和 pH 值 3.35），轻度条件下（85 °C，30 min 和 pH 值 7.0）乳清蛋白形成凝胶的速度最慢，但重度条件下形成凝胶结构稳定性低于其他条件，其凝胶强度较低且易发生倒塌。表明不同条件下形成的乳清蛋白凝胶的凝胶特性和网络结构有所不同，因此，可以根据应用范围进行选择凝胶的制备方法，以满足加工条件需求，拓展乳清蛋白凝胶的应用领域。

1.2.2 酸碱度

乳清蛋白属于球状蛋白，能够形成外观为透明或不透明的凝胶，且凝胶特性有所不同。当蛋白质溶液 pH 值与其等电点 (pI 值) 相近时，蛋白质分子之间的静电排斥力较弱，使得蛋白质分子发生聚集，形成具有不透明外观和低持水性的颗粒凝胶；相反，当蛋白质溶液 pH 值远离 pI 值时，形成由变性蛋白质分子的线性聚集体网络组成的细链凝胶，其外观透明且持水性高^[9,15]。Alting 等^[16]研究表明低 pH 值 (2.5~3.5) 下乳清蛋白聚集体之间不会形成二硫键交联，并且凝胶会脱水收缩和自发断裂，限制了乳清蛋白凝胶的应用。另外，Britten 等^[17]乳清蛋白聚集体用葡萄糖酸- δ -内酯调节溶液 pH 值至 4.6，形成不透明的颗粒凝胶，其具有的凝胶特性适用于生产酸奶。

1.2.3 离子强度

添加盐离子 (通常是 Ca^{2+} 和 Na^{+}) 能够促进热诱导变性的乳清蛋白聚集体溶液形成凝胶。这是由于在乳清蛋白凝胶形成的过程中，盐离子的加入通过减弱静电相互作用而利于蛋白质分子通过其他相互作用形成稳定的凝胶网络结构，且凝胶的凝胶特性与盐离子的浓度有关^[18]。通常认为，在低离子强度下形成的乳清蛋白凝胶为细链凝胶，凝胶网络结构较为均匀致密，具有较高的持水性，而高离子强度下形成颗粒凝胶，凝胶网络结构较为疏松，故凝胶持水性较低^[19]。因此，可以通过调节盐离子的浓度获得不同微观结构的乳清蛋白凝胶，制备具有不同感官和理化特性的食品。此外，Britten 等^[17]研究发现，乳清蛋白凝胶在 pH 值 8.5 时形成的凝胶的硬度随着 Ca^{2+} 浓度的增加而增加，而在 pH 值 6.5 时形成的凝胶的硬度随着 Ca^{2+} 浓度的增加而减少，这可能不同条件下乳清蛋白聚集体的特性有关，说明盐离子对乳清蛋白凝胶的影响同时也受到其他因素的影响。因此，未来的研究应集中在探究多种因素对乳清蛋白凝胶的影响，以拓展其在不同领域的应用。

2 乳清蛋白基凝胶的类型

基于乳清蛋白基凝胶具有三维网络结构能够包埋和保护活性物质，其具有缓释和控释功能，可以提高生物活性物质的稳定性和生物利用度^[20]。此外，乳清蛋白具有生物相容性和可降解性，其在体内降解产物被视为是安全的，适用于构建生物活性物质的载体。目前，根据乳清蛋白功能特性 (主要是凝胶特性)，其主要类型有热诱导凝胶、冷诱导凝胶、自组装和乳液凝胶。

2.1 热诱导凝胶

热诱导凝胶是指乳清蛋白加热至 70 °C 以上，蛋白质结构部分或完全展开，通过共价键 (分子间或分子内二硫键) 和非共价相互作用 (如氢键、静电和疏水相互作用) 发生聚集，从而形成三维网络结构的凝胶，能够用于封装活性物质^[21]。图 1 展示了乳清蛋白受热的凝胶化过程。Hadiseh 等^[22]制备乳清蛋白热诱导凝胶用于负载咖啡因，发现其在酸性条件下的释放率高于中性条件，可能是由于凝胶在酸性条件下对水合氢离子的吸收大于水分子，促进了凝胶网络中咖啡因的释放。

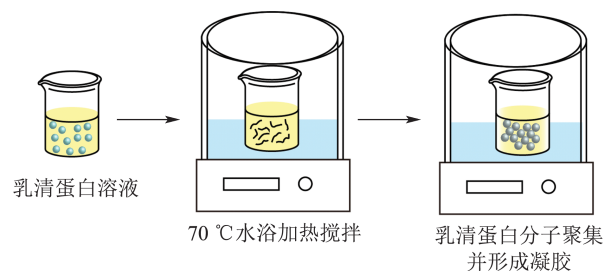


图 1 乳清蛋白受热的凝胶化过程机理图

Fig.1 Mechanism of gelation process of whey protein by heat

目前，针对单一乳清蛋白热诱导凝胶结构不稳定且在胃肠中易被降解，研究者发现将乳清蛋白与其他天然成分如多糖、多酚和表面活性分子等形成复合物，可以提高其稳定性和凝胶特性，适用于负载活性物质。Liu 等^[23]制备了负载槲皮素的乳清蛋白-莲藕支链淀粉水凝胶，槲皮素的包封率为 92%，在室温下储藏 35 d 后，凝胶中槲皮素的保留率高于 80%，且在紫外光照条件下 180 min 后的保留率大于 70%，表明该水凝胶提高了槲皮素的储存稳定性和光降解稳定性。此外，多糖的加入提高了复合水凝胶的稳定性，其在胃消化过程中保护槲皮素，实现缓释效果和肠道靶向释放的功能，从而增强活性物质的生物利用度。Zhong 等^[24]研究发现具有生物活性的葛根素能够促进乳清蛋白形成凝胶，这是因为葛根素可以通过氢键与乳清蛋白结合并增强了蛋白质分子之间的相互作用，形成均匀致密的凝胶网络结构，这也有助于功能性食品的开发。此外，Zhong 等^[25]研究发现非离子生物表面活性剂 (甜菊糖苷) 可以通过氢键或疏水相互作用与乳清蛋白结合，改变了蛋白质的结构，促进乳清蛋白热诱导凝胶中三维网络的形成，改善了凝胶的凝胶特性，为提升热诱导凝胶的凝胶性能提供了新的途径。可见，不同天然复合物提高热诱导凝胶的凝胶特性的机制有所不同，这为设计适宜特性的乳清蛋白热诱导凝胶体系提供了一定的理论基础，通过选择不同的天然成分

与乳清蛋白复合可拓展了其在食品、生物医药和化妆品等领域的应用。

2.2 冷诱导凝胶

乳清蛋白冷诱导凝胶形成一般分为两个步骤，第一步涉及蛋白质的去折叠，通常是在中性环境下加热完成的；第二步调节溶液 pH 值以达到蛋白质的 pI 值（酸诱导凝胶化）或加入盐离子（盐诱导凝胶化）促使形成水凝胶，适用于热敏性活性物质的载体^[14]。Lee 等^[26]利用乳清蛋白冷诱导凝胶的成胶特性，成功制备出负载维生素 D₃ 的乳清蛋白冷诱导凝胶，包封率高达 98%，且乳清蛋白通过疏水相互作用与维生素 D₃ 相结合，以及利用乳清蛋白中的 β -乳球蛋白游离巯基基团具有抗氧化功能，可以保护其免受氧化降解，从而提高了维生素 D₃ 的稳定性。

单一乳清蛋白冷诱导凝胶易脱水收缩和机械强度低，且作为递送载体时易受环境因素的影响，通过与多糖、蛋白质结合和添加酶等方法，可增强凝胶的稳定性，进而提高封装物质的包埋率、稳定性和生物利用度。Zahra 等^[27]利用结冷胶-乳清蛋白冷诱导凝胶

负载铁离子，封装率为 93%，在模拟胃肠道释放率分别为 88% 和 28%，表明该冷诱导凝胶适用于递送铁离子，这也为营养素功能食品的开发和应用提供参考价值。此外，Shao 等^[28]利用醋酸诱导乳清蛋白-玉米醇溶蛋白形成凝胶用于负载槲皮素并研究该水凝胶的稳定性和槲皮素的抗氧化能力，发现复合凝胶具有较高的 pH 值和储藏稳定性，且槲皮素的自由基清除率为 36%，生物可及性为 24%，表明该水凝胶能够用于递送疏水性活性物质。Zhao 等^[29]采用超声辅助谷氨酰胺转氨酶制备出乳清蛋白冷凝胶，并用于负载核黄素，研究发现超声辅助酶交联提高了凝胶的质构特性、冻融稳定性和核黄素的保留率（高达 88%），且延缓了核黄素在模拟胃肠道消化过程的释放率，说明该凝胶具有控制释放核黄素的潜力，这也为开发水溶性活性物质的缓释载体提供新的途径。因此，通过与其他天然物质结合或引入酶等方法可以有效的提高乳清蛋白冷凝胶的凝胶特性和稳定性，同时，利于其作为生物活性物质的载体，且具有缓释和控释功效，促进了乳清蛋白基水凝胶的应用。

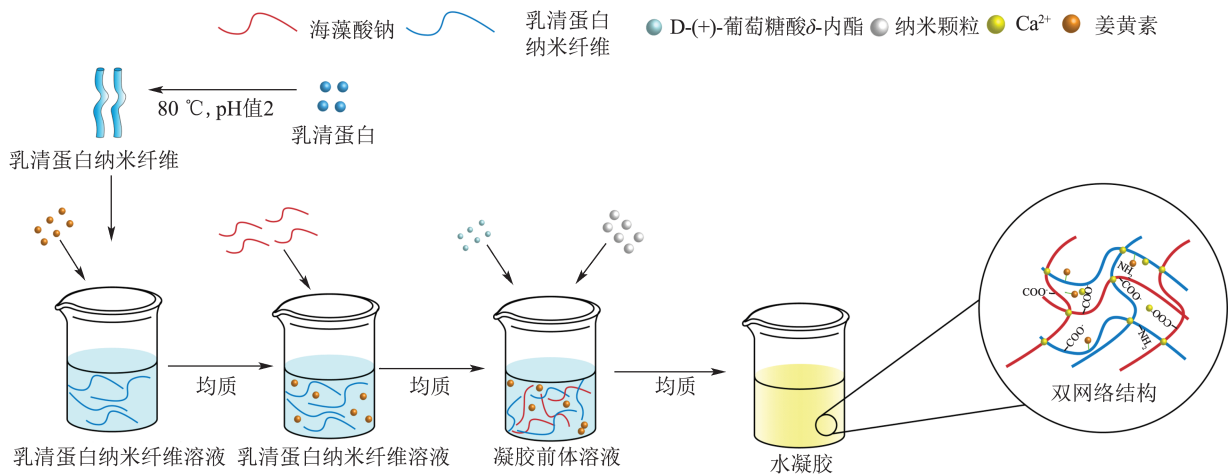


图 2 海藻酸钠-乳清蛋白纳米纤维冷诱导凝胶封装姜黄素的机理图

Fig.2 Mechanism of sodium alginate-whew protein nanofibres cold-induced gel encapsulation of curcumin

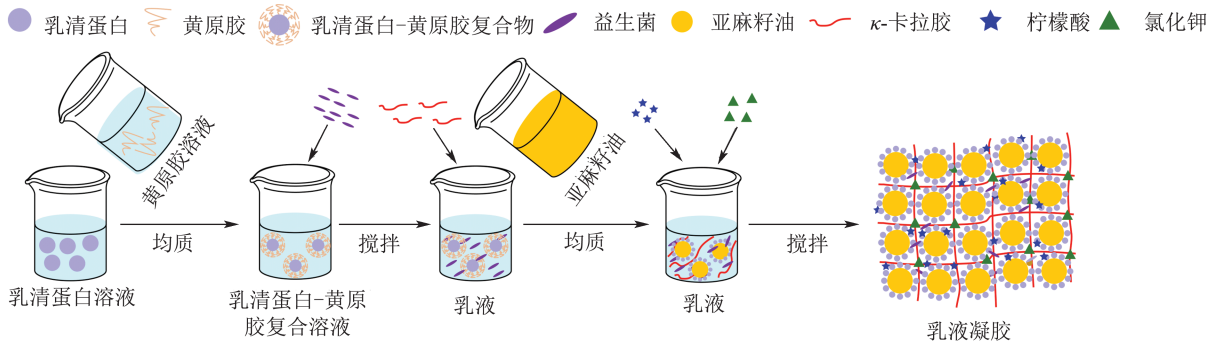


图 3 乳清蛋白-黄原胶复合物和 κ -卡拉胶的双网络乳液凝胶封装益生菌的机理图

Fig.3 Mechanism of probiotic encapsulation by a dual network emulsion gel of whey protein-xanthan gum complex and κ -carrageenan

表 1 封装生物活性物质的乳液凝胶
Table 1 Emulsion gels encapsulating bioactives

原料	活性物质	功能	参考文献
乳清蛋白-亚麻籽胶	虾青素	具有缓释效果, 提高了虾青素的生物可及性, 达到 72%	[40]
乳清蛋白-黄原胶	姜黄素	提高姜黄素的稳定性	[41]
乳清蛋白-透明质酸	槲皮素	提高槲皮素的生物可利用性, 达到 55%	[42]
乳清蛋白-海藻酸钠	番茄红素	提高番茄红素的光化学稳定性和生物可利用性 (70%)	[43]
乳清蛋白-热变性乳清蛋白	β -胡萝卜素	提高 β -胡萝卜素的光化学稳定性和热稳定性	[44]

表 2 不同类型乳清蛋白基凝胶的优点和局限性
Table 2 Advantages and limitations of different types of whey protein-based gels

类型	优点	局限性	参考文献
热诱导凝胶	制备简单, 具有可调节性、靶向释放包埋物质, 提高活性物质的生物利用性	活性物质易降解	[22,45]
冷诱导凝胶	凝胶特性优良, 适用于封装热敏性活性物质, 以提高其稳定性和生物可及性	稳定性不高, 受离子、酶降解等的影响	[27,29]
自组装	用于亲水和疏水性活性物质的递送, 封装率较高, 提高了活性物质的稳定性和生物利用度	制备方法复杂, 自组装产物不稳定, 易发生聚集	[32]
乳液凝胶	具有乳液和凝胶的优点, 能够封装亲水和亲脂性活性物质, 具有靶向和控释的功能, 提高活性物质的生物利用度	负载率不高, 稳定性易受乳液中油相的影响	[34]

2.3 自组装凝胶

乳清蛋白在酸性条件 (pH 值 2) 和低离子强度下加热一定的时间可自组装形成乳清蛋白原纤维, 相比于天然乳清蛋白, 其凝胶特性有所提升, 且具有多种官能团, 能与活性物质相结合, 因此, 乳清蛋白原纤维能够用于封装和输送活性物质^[30,31]。Wu 等^[32]利用乳清蛋白原纤维的凝胶性, 制备出了负载表没食子儿茶素没食子酸酯 (Epigallocatechin Gallate, EGCG) 的纤维状和颗粒状凝胶, 与天然乳清蛋白凝胶相比, 自组装凝胶具有更致密的凝胶网络和更强的机械强度, 且 EGCG 的封装率更高 (分别为 94% 和 95%), 表明自组装凝胶是有效的活性物质递送载体。同样的, Zhu 等^[33]制备了麦醇溶蛋白纳米颗粒-乳清蛋白原纤维水凝胶, 并用于负载姜黄素, 包封率可达到 89%, 且在紫外线照射 7 d 后, 姜黄素的保留率高达 75%, 表明该水凝胶可以提高姜黄素的热稳定性和光降解稳定性, 能够用于递送疏水性活性物质。此外, 单一乳清蛋白原纤维凝胶的机械性能和功能特性有限, 通过与其他物质复合以提升凝胶的性能, 促进其应用范围。如 Wu 等^[31]制备了海藻酸钠-乳清蛋白纳米纤维冷诱导凝胶, 并研究了其与姜黄素的相互作用, 研究发现海藻酸钠通过静电相互作用与乳清蛋白纳米纤维形成具有良好凝胶特性的双网络凝胶, 并通过氢键、范德华力和疏水相互作用与姜黄素结合, 包封率高达 91%, 表明该水凝胶能够用于递送热敏性活性物质, 图 2 为

海藻酸钠-乳清蛋白纳米纤维冷诱导凝胶封装姜黄素的机理图^[31]。

乳清蛋白自组装为构建新型蛋白质基凝胶递送载体提供了有效的方法, 其形成的乳清蛋白原纤维具有多种官能团, 能够通过不同相互作用与活性物质结合, 从而提高活性物质的稳定性和生物利用度。然而, 乳清蛋白自组装形成乳清蛋白原纤维的结构和聚集程度受到 pH 值和加热时间的影响, 进而影响其凝胶化行为, 且对其封装活性物质的封装率和稳定性也有一定的影响。此外, 目前关于乳清蛋白自组装的形成机制和构建递送载体的研究较少, 未来的研究方向不仅要集中在乳清蛋白自组装形成过程和机制的系统研究, 也应系统地评估乳清蛋白质原纤维水凝胶的凝胶机制和性质, 为构建蛋白质自组装载体提供方法和理论基础, 拓展其在生物医药、化妆品和食品等领域的应用。

2.4 乳液凝胶

乳液凝胶是指油滴分散在凝胶基质中的一种典型的半固状食品体系, 蛋白质形成的乳液凝胶有两种类型: 一种是乳化的液滴填充到具有三维网络结构的凝胶基质中 (即乳液填充凝胶), 一种是通过采用自上而下或自下而上的方法将乳液液滴封装到凝胶基质中而形成 (即乳液颗粒凝胶), 兼具乳液和凝胶的优点, 能够同时包埋亲水或疏水成分^[34]。乳清蛋白具有乳化性和胶凝性, 能够用作乳化剂以稳定乳液或用作胶凝剂形成蛋白质凝胶, 因此, 乳清蛋白适用于构建乳液凝胶,

通常采用调节 pH 值、热处理、添加离子和酶诱导等方式形成蛋白质基的乳液凝胶^[35,36]。Zhao 等^[37]构建了乳清蛋白乳液凝胶并用于负载 β -胡萝卜素,发现乳液凝胶中的 β -胡萝卜素经 60 °C 下储存 35 d 后的保留率为 64%,生物可及性为 59%。通过对蛋白质进行预处理(如热处理、微波和超声波等)可以增强蛋白质分子间的相互作用和表面活性,促进其聚集以提高其功能特性。如 Anthony 等^[38]发现经超声波预处理后的乳清蛋白与海藻酸钠的结合程度更高,形成稳定的乳液凝胶并用于封装菊粉,包封率高达 99%,且乳液凝胶具有良好的稳定性,这为设计适宜功能特性的乳液凝胶提供了理论基础,促进其在功能性凝胶状食品的应用。此外,Shen 等^[39]制备了具备双网络结构的乳液凝胶并用于包埋嗜酸乳杆菌,研究发现双网络乳液凝胶提高了巴氏杀菌后益生菌的存活率和储存稳定性,且提高了益生菌在模拟胃肠道消化后的存活率,表明该双网络乳液凝胶是益生菌封装的理想载体,图 3 为乳清蛋白-黄原胶复合物和 κ -卡拉胶的双网络乳液凝胶封装益生菌的机理图^[39]。表 1 展示了一些基于乳清蛋白的乳液凝胶用于负载生物活性物质的主要特性。乳液凝胶作为生物活性物质的载体、保护剂和控释体系,为开发功能性产品提供了一定的理论基础。此外,基于乳清蛋白的凝胶特性,能够形成热固性乳液凝胶和冷固性乳液凝胶,为设计不同结构和特性的蛋白质基乳液凝胶奠定了基础,是良好的生物活性物质递送系统,但其释放特性的机制和提高负载物的生物利用度的能力仍需进一步研究。表 2 概述了不同类型乳清蛋白基凝胶的优点和局限性。

3 乳清蛋白基凝胶的应用

3.1 益生菌封装

益生菌具有调节肠道功能、改善乳糖耐受性和维持肠道微生态平衡方面的优点,对人体健康有益,但其易受环境因素的影响,限制了益生菌在食品工业中的应用^[46]。乳清蛋白基凝胶具有生物相容性和生物可降解性,且其具有的网络结构可以包裹益生菌,保护其免受环境因素的影响,且具有靶向释放的潜力,能够提高益生菌的生物利用度,是优良的益生菌递送材料。Bora 等^[47]制备了负载嗜酸乳杆菌的苦瓜多糖-乳清蛋白复合凝胶,包封率高达 98%,且提高了益生菌的储存稳定性和模拟胃肠道消化后的存活率,表明该凝胶能够用于封装和保护益生菌并起到益生元作用,为食品强化和功能性食品生产开辟了新的途径。此外,Qin 等^[35]通过酶和 CaCl_2 双重诱导制备了乳清蛋白复

合乳液凝胶并用于封装植物乳杆菌,复合乳液凝胶具有双网络结构,提高了益生菌胃肠道活力,且具有结肠靶向释放的特性,说明该复合乳液凝胶是良好的益生菌载体,这也为开发凝胶型功能性食品提供了一种有效的方法。

3.2 营养素功能性食品开发

铁是一种必需的微量营养素,在运输氧气、增强代谢酶活性和调节免疫力等方面发挥着重要作用,缺乏微量营养素对人体健康有害,开发补充铁的功能性食品是一种有效的方法^[48]。乳清蛋白具有两亲性和多种氨基酸,能够与铁相结合,保护其免受氧化,提高其生物利用度和肠道吸收^[49]。Durán 等^[50]制备了乳清蛋白-海藻酸钠复合凝胶封装铁,发现复合凝胶中的铁含量为 34 mg,满足儿童、青少年和孕妇等人口服铁的推荐剂量。此外,在模拟胃条件下释放率很低,实现肠道靶向释放(释放率 83%~100%),表明该复合凝胶是一种新颖的口服铁补充剂。此外,乳清蛋白冷诱导凝胶也适用于递送铁,其封装率为 93%,在酸性和中性 pH 值条件下铁的累积释放量分别提高到 71% 和 9%,而在模拟胃肠道释放率分别为 88% 和 28%。这一研究结论拓展了乳清蛋白冷诱导凝胶递送系统在制备营养素功能食品的开发和应用。

3.3 挥发风味物质包封

一些带有香气化合物的食品添加剂和产品具有其独特的风味,影响着其感官质量和消费者的可接受性。然而,大多数风味香精物质是低相对分子质量的挥发性化合物,对空气、光和热敏感,稳定性较差,常通过封装技术以提高其稳定性和生物利用度,实现缓慢释放^[51]。乳清蛋白基凝胶具有生物相容性、可降解性以及安全性,适用于递送挥发性风味物质,具有较高的包封率和受控及可持续释放特点。Paraskevopoulou 等^[52]采用酸诱导制备出乳清蛋白-羧甲基纤维素水凝胶,并用于包封橙油香气化合物,发现在酸性条件形成的凝胶能够更有效的保留橙油中的多种萜烯化合物,起到了屏障阻隔的作用,从而减缓了香气物质的挥发速度,为开发风味物质的优良载体提供了新的途径。针对风味物质的水不溶性,研究者构建了递送系统用于溶解风味分子,保留风味同时利于其掺入到不同的产品中,且能够在设定的条件下控制风味物质的释放。如 Kwan 等^[53]制备出了负载柠檬烯的低甲氧基果胶-乳清蛋白可溶性水凝胶,延缓了柠檬烯的释放,且能被人工唾液分解释放,表明该水凝胶能够用于封装和释放柠檬烯,拓展了风味食品的开发途径。

4 总结与展望

蛋白质凝胶具有三维网络结构,能够包埋生物活性物质,保护生物活性物质免受环境因素的影响且有利于缓慢释放,提高其生物利用度。乳清蛋白基凝胶具有良好的凝胶特性和三维网络结构,能够包裹生物活性物质同时能够保护其免受氧气、光和热等环境因素的影响,也能够延长活性物质在胃肠道中的滞留时间,起到缓释效果,从而提高了其生物利用度。与单一乳清蛋白凝胶相比,经过与多糖、多酚和表面活性分子等物质结合形成的复合凝胶的稳定性和递送活性物质的能力有所提升,利于其在食品、生物医药和化妆品等领域的应用。此外,乳清蛋白基凝胶在递送益生菌、功能性食品开发和延长风味物质释放时间等方面具有很好的应用价值。然而,乳清蛋白基凝胶作为活性物质载体和在食品领域的应用潜力仍需挖掘。一是需要提升乳清蛋白基凝胶的机械性能,以满足不同领域的需求;二是乳清蛋白基凝胶的结构与包埋物质的效率和释放速率的关系不明晰,仍需进一步研究;三是开发对pH值、温度等因素具有多重响应的智能乳清蛋白基凝胶,以实现生物活性物质的可控释放;四是优化乳清蛋白基凝胶的制备方法,提高生物活性物质的负载率,同时在胃肠道中能够完全释放活性物质,从而提高其生物利用度;五是研究其他活性官能团,并对乳清蛋白基凝胶进行化学修饰,以定向递送至小肠和结肠等人体部位。

参考文献

- [1] LIU K, CHEN Y Y, ZHA X Q, et al. Research progress on polysaccharide/protein hydrogels: Preparation method, functional property and application as delivery systems for bioactive ingredients [J]. Food Research International, 2021, 147: 110542.
- [2] BANWO K, OLOJEDE A O, ADESULU-DAHUNSI A T, et al. Functional importance of bioactive compounds of foods with potential health benefits: a review on recent trends [J]. Food Bioscience, 2021, 43: 101320.
- [3] 刘博文,孙洋,康宇,等.食品凝胶递送体系的应用及研究进展[J].食品与发酵工业,2024,50(13):377-387.
- [4] EL-AIDIE S A M, KHALIFA G S A. Innovative applications of whey protein for sustainable dairy industry: environmental and technological perspectives-a comprehensive review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(2): E13319.
- [5] HU Y, HE C, JIANG C, et al. Complexation with whey protein fibrils and chitosan: a potential vehicle for curcumin with improved aqueous dispersion stability and enhanced antioxidant activity [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 104: 105729.
- [6] PIRES A F, GARCIA MARNOTES N, DIAZ RUBIO O, et al. Dairy By-Products: a review on the valorization of Whey and Second Cheese Whey [J]. Foods, 2021, 10(5): 1067.
- [7] TORO-SIERRA J, TOLKACH A, KULOZIK U. Fractionation of α -Lactalbumin and β -Lactoglobulin from whey protein isolate using selective thermal aggregation, an optimized membrane separation procedure and resolubilization techniques at pilot plant scale [J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(4): 1032-1043.
- [8] KONG F, KANG S, ZHANG J, et al. The non-covalent interactions between whey protein and various food functional ingredients [J]. Food Chemistry, 2022, 394: 133455.
- [9] RAMOS O L, PEREIRA J O, SILVA S I, et al. Effect of composition of commercial whey protein preparations upon gelation at various pH values [J]. Food Research International, 2012, 48(2): 681-689.
- [10] LI M, HE X, ZHAO R, et al. Hydrogels as promising carriers for the delivery of food bioactive ingredients [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1006520.
- [11] ABAEE A, MOHAMMADIAN M, JAFARI S M. Whey and soy protein-based hydrogels and nano-hydrogels as bioactive delivery systems [J]. Trends Food Science Technology, 2017, 70: 69-81.
- [12] JIANG S, HUSSAIN M A, CHENG J, et al. Effect of heat treatment on physicochemical and emulsifying properties of polymerized whey protein concentrate and polymerized whey protein isolate [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2018, 98: 134-140.
- [13] ARASH A, MEHDI M, MAHDI JAFARI S. Whey and soy protein-based hydrogels and nano-hydrogels as bioactive delivery systems [J]. Trends Food Sci Tech, 2017, 70: 69-81.
- [14] MARTIN A H, DE JONG G A H. Impact of protein pre-treatment conditions on the iron encapsulation efficiency of whey protein cold-set gel particles [J]. European Food Research and Technology, 2012, 234(6): 995-1003.
- [15] VARDHANABHUTI B, KHAYANKAN W, FOEGEDING E A. Formation of elastic whey protein gels at low pH by acid equilibration [J]. Journal of Food Science, 2010, 75(5): E305-E313.
- [16] ALTING A C, DE JONGH H H J, VISSCHERS R W, et al. Physical and chemical interactions in cold gelation of food proteins [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(16): 4682-4689.
- [17] BRITTEN M, GIROUX H J. Acid-induced gelation of whey protein polymers: effects of pH and calcium concentration during polymerization [J]. Food Hydrocolloids, 2001, 15(4-6): 609-617.
- [18] IKEDA S. Heat-induced gelation of whey proteins observed by rheology, atomic force microscopy, and raman scattering spectroscopy [J]. Food Hydrocolloids, 2003, 17(4): 399-406.
- [19] CHANTRAPORNCHAI W, MCCLEMENTS D J. Influence of NaCl on optical properties, large-strain rheology and water holding capacity of heat-induced whey protein isolate gels [J]. Food Hydrocolloids, 2002, 16(5): 467-476.
- [20] KANG L, XUE-QIANG Z, WEN-DI S, et al. The hydrogel of whey protein isolate coated by lotus root amylopectin enhance the stability and bioavailability of quercetin [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 236: 116009.
- [21] SHANSHAN J, HUSSAIN M A, JIANJUN C, et al. Effect of heat treatment on physicochemical and emulsifying properties of polymerized whey protein concentrate and polymerized whey protein isolate [J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 98: 134-140.
- [22] ZAND-RAJABI H, MADADLOU A. Caffeine-loaded whey protein hydrogels reinforced with gellan and enriched with calcium chloride [J]. International Dairy Journal, 2016, 56: 38-44.
- [23] LIU K, ZHA X-Q, SHEN W-D, et al. The hydrogel of whey protein isolate coated by lotus root amylopectin enhance the stability and

- bioavailability of quercetin [J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 236: 116009.
- [24] ZHONG Y, ZHAO J, DAI T, et al. The effect of whey protein-puerarin interactions on the formation and performance of protein hydrogels [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 113: 106444.
- [25] ZHANG T, XIA Y, PENG Q. Steviol glycosides improve the textural properties of whey protein gel [J]. Journal of Food Engineering, 2024, 369: 111912.
- [26] LEE J, DUGGAN E. Improved stability of vitamin D₃ encapsulated in whey protein isolate microgels [J]. International Dairy Journal, 2022, 129: 105351.
- [27] KAZEMI-TASKOOH Z, VARIDI M. Designation and characterization of cold-set whey protein-gellan gum hydrogel for iron entrapment [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 111: 106205.
- [28] FENG S, YUANLONG Z, XIA W, et al. Improving the properties of whey protein isolate-zein nanogels with novel acidifiers: Re-dispersity, stability and quercetin bioavailability [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 266(Part 2): 131284.
- [29] ZHAO Y, YAN M, XUE S, et al. Influence of ultrasound and enzymatic cross-linking on freeze-thaw stability and release properties of whey protein isolate hydrogel [J]. J Dairy Sci, 2022, 105(9): 7253-7265.
- [30] YAXU M, HAN J, HANGYAN J, et al. Co-encapsulation of curcumin and piperine in whey protein isolate fibrils improves their water dispersibility and antioxidant activity [J]. Food Bioscience, 2024, 58: 103750.
- [31] WU S, WANG L, ZHAO Y, et al. Fabrication of high strength cold-set sodium alginate/whey protein nanofiber double network hydrogels and their interaction with curcumin [J]. Food Research International, 2023, 165: 112490.
- [32] WU Y, WU J, MENG X, et al. The gel mechanism and carrier quality of fibrous and granular whey protein self-assembly [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 136: 108302.
- [33] ZHU Y, HAN Y, PENG S, et al. Hydrogels assembled from hybrid of whey protein amyloid fibrils and gliadin nanoparticles for curcumin loading: microstructure, tunable viscoelasticity, and stability [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9.
- [34] TORRES O, MURRAY B, SARKAR A. Emulsion microgel particles: novel encapsulation strategy for lipophilic molecules [J]. Trends Food Sci Tech, 2016, 55: 98-108.
- [35] QIN X, BO Q, QIN P, et al. Fabrication of WPI-EGCG covalent conjugates/gellan gum double network emulsion gels by duo-induction of GDL and CaCl₂ for colon-controlled lactobacillus plantarum delivery [J]. Food Chemistry, 2023, 404: 134513.
- [36] XU Y, SUN L, ZHUANG Y, et al. Protein-Stabilized emulsion gels with improved emulsifying and gelling properties for the delivery of bioactive ingredients: a review [J]. Foods, 2023, 12(14): 2703.
- [37] ZHAO R, FU W, CHEN Y, et al. Structural modification of whey protein isolate by cinnamaldehyde and stabilization effect on β -carotene-loaded emulsions and emulsion gels [J]. Food Chemistry, 2022, 366: 130602.
- [38] ORTIZ-DELEON A M, ROMAN-GUERRERO A, SANDOVAL-CASTILLA O, et al. Characterization of O/W emulgels based on whey protein-alginate-inulin coacervates: influence of temperature and ultrasound as protein preconditioning process [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 265(Pt 2): 131260.
- [39] SHEN J, CHEN Y, LI X, et al. Enhanced probiotic viability in innovative double-network emulsion gels: synergistic effects of the whey protein concentrate-xanthan gum complex and κ -carrageenan [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 270: 131758.
- [40] ZHANG Z, CHEN W, ZHOU X, et al. Astaxanthin-loaded emulsion gels stabilized by Maillard reaction products of whey protein and flaxseed gum: physicochemical characterization and *in vitro* digestibility [J]. Food Research International, 2021, 144: 110321.
- [41] GEREMIAS-ANDRADE I M, SOUKI N P D B G, MORAES I C F, et al. Rheological and mechanical characterization of curcumin-loaded emulsion-filled gels produced with whey protein isolate and xanthan gum [J]. Lwt-Food Science and Technology, 2017, 86: 166-173.
- [42] WANG N, ZHANG K, CHEN Y, et al. Tuning whey protein isolate/hyaluronic acid emulsion gel structure to enhance quercetin bioaccessibility and *in vitro* digestive characteristics [J]. Food Chemistry, 2023, 429: 136910.
- [43] LIU F, LIANG X, YAN J, et al. Tailoring the properties of double-crosslinked emulsion gels using structural design principles: physical characteristics, stability, and delivery of lycopene [J]. Biomaterials, 2022, 280: 121265.
- [44] LU Y, MAO L, ZHENG H, et al. Characterization of β -carotene loaded emulsion gels containing denatured and native whey protein [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 102: 105600.
- [45] TONGTONG Z, YONGMEI X, QINGRUI P. Steviol glycosides improve the textural properties of whey protein gel [J]. Journal of Food Engineering, 2024, 369: 111912.
- [46] 陈臣, 张晓丛, 袁海彬, 等. 益生菌包埋前沿技术及其研究进展 [J]. 中国食品学报, 2023, 23(1): 384-396.
- [47] BORA A F M, KOUAME K J E, LI X, et al. Development, characterization and probiotic encapsulating ability of novel momordica charantia bioactive polysaccharides/whey protein isolate composite gels [J]. Int J Biol Macromol, 2023, 225: 454-466.
- [48] AOQIONG Z, JUNCAI L, RUIJIN Y, et al. Preparation of a novel and stable iron fortifier: self-assembled iron-whey protein isolate fibrils nanocomposites [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(7): 4296-4306.
- [49] KAZEMI-TASKOOH Z, VARIDI M. Food-based iron delivery systems: A review [J]. Trends Food Science Technology, 2021, 116: 75-89.
- [50] DURAN E, CHURIO O, ARIAS J L, et al. Preparation and characterization of novel edible matrices based on alginate and whey for oral delivery of iron [J]. Food Hydrocolloids, 2020, 98: 105277.
- [51] ENGLISH M, OKAGU O D, STEPHENS K, et al. Flavour encapsulation: a comparative analysis of relevant techniques, physiochemical characterisation, stability, and food applications [J]. Frontiers in Nutrition, 2023, 10: 1019211.
- [52] PARASKEVOPOULOU A, TSIOGA E, BILIADERIS C G, et al. Acid-induced gelation of aqueous WPI-CMC solutions: effect on orange oil aroma compounds retention [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 30(1): 368-374.
- [53] KWAN A, DAVIDOV-PARDO G. Controlled release of flavor oil nanoemulsions encapsulated in filled soluble hydrogels [J]. Food Chemistry, 2018, 250: 46-53.