

自组装工艺在药食同源功能食品中的应用

尹小明^{1,2,3*}, 高艺航^{1,3,4}, 阮文浩^{1,3,4}, 张 玺^{1,3,4}, 徐义明^{1,3,4}

¹大闽食品(漳州)有限公司, 福建 漳州

²上海交通大学药学院, 上海

³上海吉罗恩生物科技有限公司, 上海

⁴福建省饮料用植物提取技术企业重点实验室, 福建 漳州

收稿日期: 2025年9月28日; 录用日期: 2025年10月29日; 发布日期: 2025年11月10日

摘 要

随着人们对健康养生和药食同源功能食品的关注持续升温, 传统中药复方中的“自组装”理念为现代食品加工提供了新的思路。中药复方由多种活性成分组成, 这些小分子可通过氢键、 π - π 堆积、静电等非共价相互作用自发形成纳米结构, 从而提高难溶性成分的溶解度和生物利用度。同时, 许多药食同源植物既可药用又可作为食材, 它们富含多酚、黄酮和多糖等功能物质, 可通过自组装载体实现安全高效的递送。本文在阐述中药复方自组装的常见类型的基础上, 进一步阐述自组装工艺在药食同源功能食品加工中的应用, 介绍典型研究案例及其对活性成分溶解度、稳定性和生物利用度的提升等关键问题。

关键词

功能食品, 生物利用度, 药食同源, 自组装

Applications of Self-Assembly Processing in Functional Foods Based on Food-Medicine Dual Purpose

Xiaoming Yin^{1,2,3*}, Yihang Gao^{1,3,4}, Wenhao Ruan^{1,3,4}, Xi Zhang^{1,3,4}, Yiming Xu^{1,3,4}

¹Damin Foodstuff (Zhangzhou) Co., Ltd., Zhangzhou Fujian

²School of Pharmacy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai

³Shanghai Jiluo Biotechnology Co. Ltd., Shanghai

⁴Fujian Key Laboratory of Plant Extraction Technology for Beverage, Zhangzhou Fujian

Received: September 28, 2025; accepted: October 29, 2025; published: November 10, 2025

*通讯作者。

文章引用: 尹小明, 高艺航, 阮文浩, 张玺, 徐义明. 自组装工艺在药食同源功能食品中的应用[J]. 食品与营养科学, 2025, 14(6): 782-791. DOI: 10.12677/hjfn.2025.146086

Abstract

As public interest in health maintenance and dual-use functional foods continues to grow, the concept of “self-assembly” embedded in traditional Chinese multi-herb formulae offers fresh perspectives for modern food processing. Composed of numerous active constituents, these formulae can spontaneously form nanostructures via noncovalent interactions—such as hydrogen bonding, π - π stacking, and electrostatic forces—thereby enhancing the solubility and bioavailability of poorly soluble compounds. Meanwhile, many botanicals designated as food and medicine dual purpose serve both medicinal and culinary roles and are rich in polyphenols, flavonoids, and polysaccharides; these bioactives can be delivered safely and efficiently through self-assembled carriers. Building on an overview of common self-assembly types observed in traditional Chinese medicine (TCM) formulae, this review focuses on applications of self-assembly processes in the manufacturing of functional foods derived from food and medicine dual purpose materials, highlighting representative case studies and discussing key issues, including improvements in the solubility, stability, and bioavailability of active ingredients.

Keywords

Functional Foods, Bioavailability, Food-Medicine Dual Purpose, Self-Assembly

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

传统中药复方由多种动植物或矿物成分组合,以“君臣佐使”协同实现整体治疗,但活性成分普遍存在溶解度和生物利用度低的问题。近年来提出的中药自组装纳米策略(CSAN)利用中药成分非共价相互作用形成天然载体或纳米粒,提高成分溶解度和体内吸收,这些自组装纳米粒在制剂实验、传统汤剂和复方煎煮中自然产生,与复方疗效密切相关[1]。随着对慢性病和营养安全的关注,药食同源植物在功能食品中应用也越来越广[2]。将中药复方自组装理念与药食同源原料结合,可为开发功能食品提供新思路,改善成分溶解性等,减少添加剂使用,实现“药食两用”递送。中药煎剂是多相体系,成分在水中反应可自发形成超分子结构[3];研究表明,黄连解毒汤中黄芩苷和小檗碱以 1:1 摩尔比通过静电作用形成两亲复合物,进一步自组装为具有亲水糖环和疏水核的超分子单元[4];黄柏与肉桂共煎时,小檗碱和肉桂酸通过氢键和 π - π 堆积形成蝴蝶状一维自组装单元,经进一步堆叠形成具有良好抑菌活性的三维超分子颗粒[5];大黄酸在碱性条件下部分离子化后,可与未电离的大黄酸分子通过 π - π 堆积和氢键形成左手螺旋纳米纤维,纤维进一步交联形成三维水凝胶;这种大黄酸凝胶相比游离药物具有更好的持续释放和神经炎症预防效果[6]。研究还发现,联用黄连和大黄时,大黄酸层状骨架通过氢键与小檗碱之间的 π - π 堆积和电荷相互作用构建稳定的层状超分子结构,显著增强了小檗碱的抗菌作用[7]。这些例子表明,中药复方中的非共价相互作用可以诱导形成纳米级超分子结构,提高难溶性成分的稳定性并发挥协同药效。

2. 自组装载体类型及其与药食同源原料的结合

中药活性成分通常存在低溶解度、不稳定和释放不可控等问题,而药食同源植物又要求加工过程温和且符合法规。基于自组装原理形成的食品级载体可以利用蛋白质、脂质、多糖等天然材料,通过非共

价作用将活性物包埋或复合，从而提高其稳定性和可摄取性。常见的自组装载体类型包含：脂质体、酪蛋白胶束、玉米醇溶蛋白与淀粉样纤维、蛋白-多糖复合凝聚、Pickering 乳液和超分子结构，如图 1 所示。

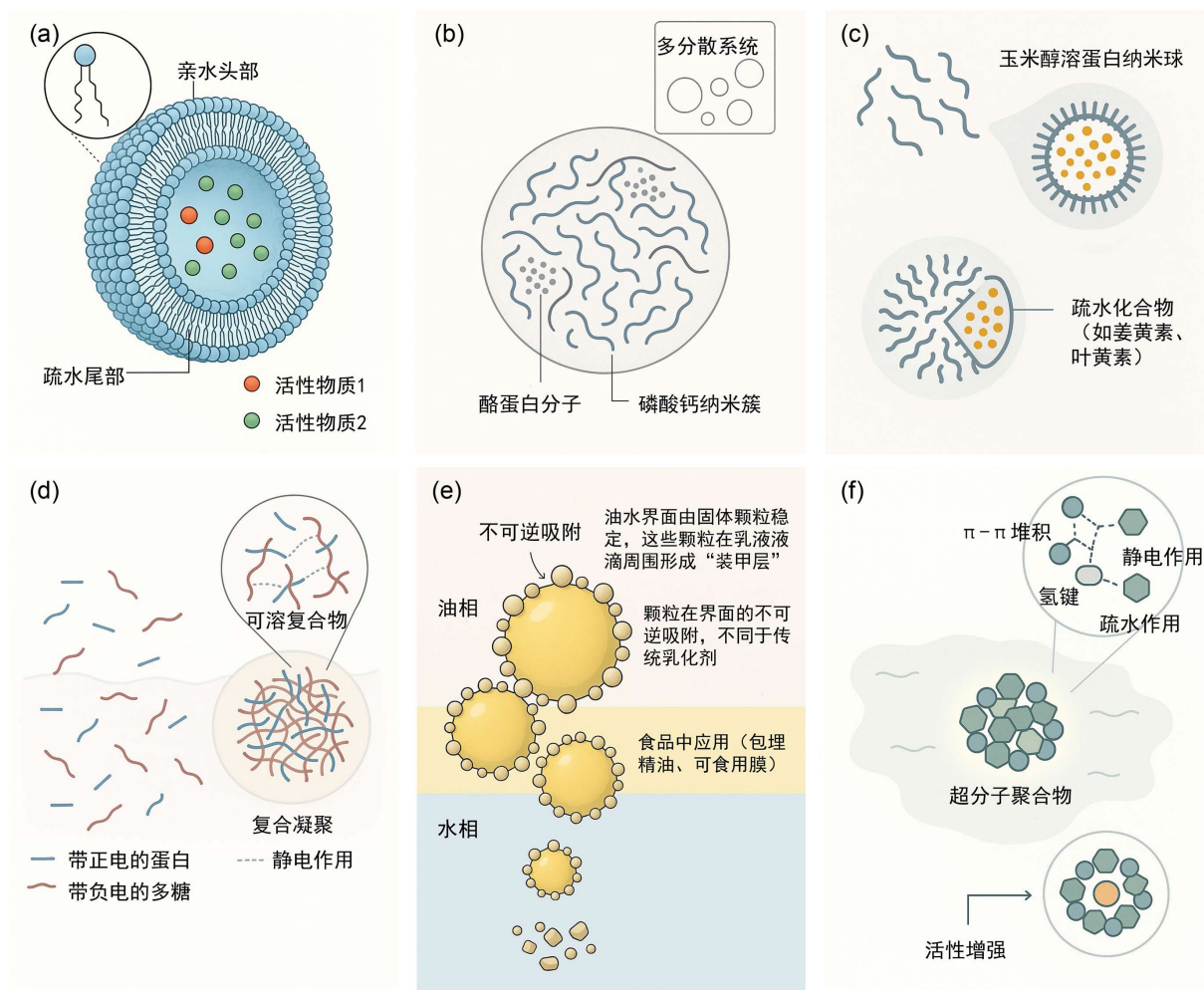


Figure 1. Common types of self-assembled carrier systems. (a) Liposomes; (b) Casein micelles; (c) Zein and amyloid(-like) fibrils; (d) Protein-polysaccharide complex coacervates; (e) Pickering emulsions; (f) Supramolecular assemblies

图 1. 常见的自组装载体类型。(a) 脂质体；(b) 酪蛋白胶束；(c) 玉米醇溶蛋白与淀粉样纤维；(d) 蛋白-多糖复合凝聚；(e) Pickering 乳液；(f) 超分子结构

2.1. 脂质体组装

脂质体是由双层磷脂围成的囊泡，可包埋疏水或亲水性活性物质，如图 1(a)所示。目前，脂质体已经广泛用于药物递送，在食品领域也逐渐兴起[8]。文献指出，脂质体通过稳定活性化合物、改善组织摄取和改善体内分布，成为生物活性物的理想输送系统[9]。在食品中，脂质体能够改善脆弱成分(例如类胡萝卜素、茶多酚、脂溶性维生素)的贮藏稳定性和生物可及性，从而开发功能饮料和营养补充品。研究者还指出，喷雾干燥、高剪切分散结合高压均质以及薄膜水化等方法可用于规模化制备脂质体，并通过添加甾醇或植物固醇调节膜的致密度以提高稳定性[8]。

另一类重要载体是固体脂质纳米粒(SLN)和纳米结构脂质载体(NLC)。NLC 通过在固态脂质中加入液

态脂质产生不完美晶格,使更多药物能够融入或分散在脂质矩阵中[10]。NLC 兼具胶束和固态矩阵的优点,具有较高载药量、良好稳定性和可调节释药曲线。研究表明,NLC 中活性成分既可以溶解在脂质基质中,也可以以细小的固体形式分散于其中;表面加入非离子表面活性剂可防止聚集和提高负载效率[10]。实际应用中,NLC 已用于保护姜黄素、叶黄素、茶多酚等天然抗氧化物,显著提高其光稳定性和储存稳定性[11]。

2.2. 酪蛋白胶束组装

酪蛋白胶束是牛奶中天然存在的纳米级复合体,由酪蛋白和非晶态磷酸钙聚集形成,典型粒径约 75 nm,粒径分布从十到几百纳米不等。每个胶束含有数百个磷酸钙纳米簇和大约 1 万个酪蛋白分子,构成多分散的胶体体系如图 1(b)所示。胶束内部富含水分(70%~80%),因此具有相对高的体积和粘弹性质。其动态结构会随着 pH、温度、离子强度等变化而响应重排[12]。

近年来,人工重组酪蛋白胶束成为新的研究热点,利用高纯度酪蛋白分馏和矿物盐重组,可以制备含有特定成分比例的人造胶束,作为天然胶束的模型并用于递送疏水活性物。重组胶束对 pH 和钙浓度具有敏感凝聚特性,能够在胃肠道环境下缓慢释放功能成分。此外,酪蛋白本身具有“分子伴侣”性质,可防止其它蛋白质在胁迫下变性聚集[12]。

2.3. 玉米醇溶蛋白与淀粉样纤维组装

玉米醇溶蛋白(Zein)是从玉米中提取的疏水性储藏蛋白,因其自组装能力、低免疫原性和良好生物相容性而获得广泛关注。Zein 在适当溶剂条件下可自组装形成纳米球或纳米纤维,用作疏水化合物(如姜黄素、叶黄素)的载体,显著提高这些成分的包封率、光稳定性和模拟消化中的生物可及性[13]; Zein 基纳米粒还可与壳聚糖或果胶复合,通过静电或氢键进一步提高盐稳定性和热稳定性,如图 1(c)所示。

另一类蛋白基自组装结构是蛋白质淀粉样纤维。乳清蛋白、酪蛋白或植物蛋白在一定 pH 和温度条件下会形成具有 β 折叠结构的纳米纤维,这些纤维具有良好的力学性能和界面活性,可用作凝胶骨架、增粘剂或载体。尽管“淀粉样”一词常与疾病相关,但研究发现消化过程中这些食品来源的淀粉样纤维会降解为无毒肽段,并未表现出细胞毒性或致病性[14]。因此,它们正逐渐被视为安全的食品结构材料。

2.4. 蛋白-多糖复合凝聚组装

蛋白-多糖复合凝聚是以静电为主、氢键和疏水作用协同驱动的可逆自组装。接近蛋白等电点时,带正电蛋白与阴离子多糖电荷中和,先生成可溶复合体,继而相分离形成富聚合物的“凝聚相”,如图 1(d)所示。pH、离子强度、配比与总固形物决定相图与粒径;盐度与温度升高常削弱凝聚。多糖电荷密度与取代度、蛋白表面疏水性和构象进一步塑形,使产物在“可溶-共沉-致密”之间可调[15]。所得微/纳米胶囊或软凝胶可显著提升多酚、类胡萝卜素、香气与益生菌的包埋率、抗氧与热/胃保护,并实现肠段触发释放。典型体系如明胶-阿拉伯胶、乳清蛋白-果胶。这种凝聚结构可用作微胶囊包埋多酚和精油,也可稳定乳液或用于蛋白分离和新型配方乳制品。另一些研究采用短肽和多糖协同组装构建功能性水凝胶。如芳香化的五肽 Fmoc-FRGDF 在生理 pH 条件下通过 π - β 堆积、芳香/静电作用和氢键自组装成纳米水凝胶。该动态可逆的非共价网络可有效包埋易受热或光分解的营养素,如维生素和多酚,是食品功能成分输送的有前景载体。通过引入透明质酸等天然多糖改善其力学性能并调节释放行为,可望用于开发智能化、可定制的蛋白质-多糖-多酚三元水凝胶体系,为功能食品提供可编程的递送平台[15]。

2.5. Pickering 乳液组装

不同于传统乳化剂通过降低表面张力来稳定油/水界面, Pickering 乳液利用固体微粒(蛋白、纤维素、

淀粉、黏土等)不可逆地吸附在界面上形成“装甲层”; Pickering 乳液由两个不相容液体组成,用有机或无机固体微粒稳定,其固体颗粒具有特定尺寸和润湿性,是传统乳化剂的替代方案,如图 1(e)所示。Pickering 乳液一般比传统乳液更稳定,具有成本低、低毒性和良好生物相容性等优点。近年来,研究者还利用玉米醇溶蛋白/阿拉伯胶纳米粒、纤维素纳米晶体和淀粉纳米颗粒制备食品级 Pickering 乳液,用于包埋香精油、构建可食性薄膜以及替代部分脂肪[16]。

值得一提的是,可溶性或不溶性膳食纤维也是重要的 Pickering 乳液稳定剂。研究显示,纤维稳定的 Pickering 乳液比传统表面活性剂稳定乳液更能抵抗浓度梯度导致的 Ostwald 熟化和滴粒团聚,同时提供纤维本身的营养功能[17]。

2.6. 超分子结构组装

超分子指两个或多个分子通过氢键、静电、疏水、 π - π 堆积等非共价相互作用自发形成有序聚集体,如图 1(f)所示。研究者发现,在中药煎煮或食品烹饪过程中,复杂成分迁移并相互作用,常常形成稳定有序的超分子结构,既可作为活性物载体促进吸收,又可能表现出超越单一成分的生物活性[3]。例如在鱼汤中观察到由三酰甘油为核心、磷脂包覆、碳水化合物嵌入边缘的球形超分子颗粒,这些颗粒具有体外抗氧化和清除细胞内自由基的能力[18];淡水蛤蜊汤中分离的超分子纳米颗粒由多糖、脂质和蛋白质构成,富含植物甾醇并能有效抑制胆固醇吸收[19]。研究者将天然大黄酸溶于 PBS 缓冲液,经超声、加热、冷却形成均匀橙红色水凝胶,结构分析显示凝胶中大黄酸以单体、二聚体和更高聚集体共存,二聚体是主要稳定单元。与游离态大黄酸比,水凝胶 24 小时显著降低 TNF- α 和 IL-1 β 表达,48 小时对多种炎症因子抑制作用更强[6]。分子机制分析表明,水凝胶持续释放阶段能更有效阻断 TLR4/NF- κ B 信号通路,抑制相关蛋白磷酸化和核移位。这表明,自组装纳米纤维水凝胶改善大黄酸溶解性和可注射性,实现缓释并增强抗炎活性,证明超分子自组装技术在药食同源功能食品和药物递送中的应用价值[6]。

3. 自组装载体在药食同源功能食品加工中的应用

3.1. 疏水多酚和类胡萝卜素的递送

疏水多酚和类胡萝卜素广泛存在于姜黄、枸杞、胡萝卜、金盏花和番茄等药食同源植物中。由于这些化合物在水相中溶解度低且易氧化,需要通过自组装载体改善其稳定性和吸收。将姜黄素、 β 胡萝卜素、叶黄素和番茄红素等包埋在酪蛋白胶束或人工胶束中,可以显著提高其溶解度并在胃肠道中缓慢释放[12]。例如,利用酪蛋白胶束递送姜黄素,可改善其光稳定性并在酸性环境下保护活性位点;在酸度升高时胶束会部分解离,释放出包埋的姜黄素,实现胃后释放。Zein 基纳米粒也被用于装载姜黄素和叶黄素,实验表明其包封率高、避光性强,并能在模拟消化体系中提高生物可及性[13]。

纳米结构脂质载体(NLC)可通过含有固态甘油单硬脂酸酯和液态甘油三酯的混合脂质,包裹 β 胡萝卜素、番茄红素或辅酶 Q10 等疏水活性物。由于矩阵中存在晶体缺陷,这些活性物不仅溶解在脂质中,还可被物理限制在固体晶格间隙内,从而提高负载量并减少贮藏期间的迁移和渗漏[10]。

除了改善理化稳定性外,多项细胞和动物试验证实,利用 NLC 等自组装脂质载体递送植物多酚和色素可以显著增强其生物功效。例如,将黄酮类化合物芹菜素装载于 NLC 后,在 NCI-H1299 肺癌细胞中表现出更强的抗增殖作用,载体本身的细胞存活率保持在 80%以上且溶血率低于 5% [20]。同时,以 α -芒果苷和蜂胶为活性物的 NLC 在糖尿病鼠皮肤创伤模型中显著提高了伤口闭合率(14 天 $85.83\% \pm 3.33\%$),组织学分析显示炎症细胞减少、成纤维细胞增殖和血管新生均明显优于游离 α -芒果苷[21]。另一项研究将姜黄素纳入 NLC 凝胶用于兔背部创伤治疗,结果表明 NLC 组在第 7 天和第 14 天的伤口闭合率分别达到 $60.39\% \pm 0.04\%$ 和 $93.73\% \pm 0.04\%$,显著高于游离姜黄素组[22]。这些体内数据表明,自组装脂质载

体不仅提高活性物的稳定性,还增强了其抗肿瘤、抗炎和组织修复效果,是药食同源功能食品开发的重要支撑。

3.2. 亲水多酚、茶多酚和抗氧化剂

亲水多酚和茶多酚广泛分布于茶叶、桑叶、枸杞叶等药食同源植物,这些多酚具有显著的抗氧化作用[23]。与疏水多酚相比,亲水抗氧化剂(如表没食子儿茶素没食子酸酯,EGCG)易被氧化和降解。EGCG是茶多酚中最具代表性的抗氧化剂之一,其原型分子不稳定且在体外实验中表现出一定的细胞毒性。韩等人以酪蛋白和多糖为骨架制备了EGCG纳米粒(EGCG NPs),并系统评价了其与游离EGCG的差异[24]。结果显示,EGCG NPs的DPPH和ABTS自由基清除能力在低浓度下略低于游离EGCG,但纳米粒在10 $\mu\text{g/mL}$ 以上浓度几乎不表现细胞毒性,而游离EGCG在60 $\mu\text{g/mL}$ 时显著降低细胞活力。更重要的是,EGCG NPs在HaCaT角质形成细胞中的摄取效率明显提升,细胞内共定位系数高达0.97,显著优于游离EGCG。在伤口愈合模型中,纳米粒处理组细胞迁移能力强,Transwell试验显示穿膜细胞数量约为游离EGCG组的2.3倍,划痕愈合面积超过30%,而游离EGCG组仅为 $21.88\% \pm 2.95\%$,对照组仅为 $16.1\% \pm 3.89\%$ 。动物放射性皮肤损伤模型进一步证明,EGCG NPs能有效缓解皮肤水肿、炎症浸润和溃疡,与游离EGCG相比在减轻辐射损伤和促进伤口愈合方面表现更优[24]。

3.3. 香气和精油递送

香料和精油广泛来源于药食同源的草药,如桂皮、姜黄、迷迭香和百里香,它们不仅赋予食品独特风味,还具有抗氧化和抗菌功效。然而这些挥发性成分易受热、光和氧影响而失活。利用Pickering乳液将精油封装在油滴中,由固体颗粒形成的界面层能够有效阻止挥发并提供缓释效果。膳食纤维或壳聚糖纳米颗粒稳定的Pickering乳液在肉制品和鲜切果蔬保鲜中表现出色,可延长货架期并保持风味[17]。研究表明,自组装微乳可以显著提高迷迭香精油的稳定性和抗菌活性。与游离精油相比,微乳显著降低了最低抑菌浓度(MIC)和杀菌浓度(MBC):对单核细胞增生李斯特氏菌和大肠杆菌,未包封精油的MIC/MBC为5.0/7.5% (v/v),而微乳的MIC下降至1.5%且MBC分别降至6.0%和3.0% [25]。这些数据说明微乳不仅改善了挥发性油的物理稳定性,还通过降低有效剂量增强了抗菌效果,为迷迭香精油在食品防腐中的应用提供了可靠依据。百里香精油的主要活性成分百里香酚同样通过自组装纳米粒实现增效。以聚乙烯醇为壁材自组装的百里香酚纳米粒具有平均粒径 $84.7 \pm 11.2 \text{ nm}$ [26]。在缓释试验中,纳米粒在96小时内逐渐释放 $74.9\% \pm 5.4\%$ 的百里香酚,平均释放速率约44.1 $\mu\text{g/mL}\cdot\text{h}$,表现出明显的初期爆发释放随后缓慢释放的模式。与空白纳米粒相比,百里香酚纳米粒在食品相关菌株上的抑菌圈明显扩大:对耐甲氧西林金黄色葡萄球菌的抑菌圈直径达到 $17.1 \pm 0.1 \text{ mm}$,对小肠结肠炎耶尔森菌为 $15.1 \pm 0.3 \text{ mm}$ 。在蓝莓保鲜试验中,含百里香酚纳米粒的处理组在5天内将小肠结肠炎耶尔森菌菌落减少到无法统计,而对照组水果出现明显腐败,表明纳米载体显著延长了储存期并改善了微生物安全性。这些研究表明,利用自组装纳米粒递送百里香酚不仅提高了其溶解度和稳定性,还增强了抗菌效果和食品保鲜能力[26]。

3.4. 益生菌和蛋白质的保护与递送

许多药食同源植物富含膳食纤维和黏性多糖,这些天然材料可作为益生菌载体或壁材。益生菌在胃酸和胆盐中容易失活。利用海藻酸盐-壳聚糖离子凝胶或层层自组装微胶囊,可显著提高益生菌在模拟胃肠环境中的存活率[27]。实验数据表明,微胶囊化可将某些乳酸菌在模拟胃液中的存活率提高一至两个数量级。以葡萄糖酸内酯诱导的海藻酸盐-壳聚糖微胶囊为例,当海藻酸盐浓度为2.5%时,包封率可达93.89%,在28天储存后存活数从8.49降至8.03 $\log\text{-CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。在模拟胃肠环境中,微胶囊化的益生菌存活量仅从10.18降至8.41 $\log\text{-CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$,而未包埋菌株则从10.67降至6.18 $\log\text{-CFU}\cdot\text{mL}^{-1}$ 。其它研究发

现,豌豆蛋白作为壁材可使植物乳植杆菌的微胶囊包封效率达 97.78%,明胶/壳聚糖微胶囊能够将植物乳植杆菌在酸奶中的存活量从 10^4 提高到 10^6 CFU·mL⁻¹,并在 10 周储藏后仍保持活性[27]。

4. 自组装纳米结构的规模化生产

4.1. 技术的规模化生产工艺与设备

实验室常用薄膜水化、超声、冻干等方法制备脂质体,但在工业化生产中需采用高效、可连续化的工艺。超临界方法(超临界抗溶剂、超临界反相蒸发)可以在无有机溶剂条件下大量制备脂质体;膜接触器结合中空纤维模块的装置能够提高界面质量传递效率,制得高包封率的脂质体[28]。同时,微流控技术也被应用于脂质体生产,通过对流道几何形状和流速的精确控制获得粒径分布窄、包封率高的脂质体[28]。对于固体脂质纳米粒和纳米结构脂质载体,高压均质是工业上最常用的规模化方法,因其不需要有机溶剂且能制备稳定的粒子[29]。热均质法将熔融的脂质与热水高速剪切并经高压均质而成,适合于热稳定活性物;冷均质法则将预乳化混合物固化粉碎后经高压均质,适用于热敏性成分,但粒径分布较宽[29]。

Zein 纳米粒、酪蛋白胶束及蛋白-多糖复合凝聚物等天然载体在实验室通过溶剂置换、电喷雾、pH 驱动或复合凝聚制备。大规模生产时,喷雾干燥是最便捷的方法,可连续制备固体粉末;其缺点是高温可能导致敏感成分降解。

微流化器利用高压将流体碰撞产生强烈剪切、空化和湍流,能在连续生产中获得稳定、粒径均一的纳米乳和纳米凝胶。在蛋白饮料中,微流化处理结合酪蛋白胶束可提高活性物质结合亲和力;在含脂乳酪及蛋黄酱中,通过调节压力和重复次数可以显著改善质构和乳化稳定性[30]。相比常规均质,微流化能在较低压力下获得更细小的液滴并减少能耗,但需要多次循环并承担设备投资。

4.2. 成本效益与经济性分析

各类工艺在能耗、设备投入和维护成本方面差异明显。高压均质是一种成熟的技术,设备价格中等,但其能耗较高,特别是冷均质过程需要反复处理以减小粒径[29]。微流化器可以在较低压力下获得均一粒径,但需要几十到上百次循环,从而增加操作时间和维护成本[31]。超临界流体技术无需有机溶剂且产品质量好,但设备造价昂贵、操作压力高,需要大量 CO₂;相比之下,喷雾干燥和挤出等工艺流程简单、投资低、能耗较小,被视为最经济的规模化方法[31]。

合适的工艺需在成本与产品质量之间权衡,例如,挤出法操作简单且成本低,但难以控制粒径均匀性;而微流控和微流化技术能制备粒径分布窄的载体,显著提高包封效率和活性物稳定性,却需要昂贵的设备和复杂的操作[31]。高压均质在生产固体脂质纳米粒时具有较高的产量和重现性,被认为是商业化最可行的方案[29]。因此,进行成本分析时需综合考虑设备投资、运行能耗、维护成本及对产品质量的影响。

4.3. 对终端产品感官品质的影响与调控

纳米化工艺不仅提高生物活性,还可能显著影响食品的口感、外观和风味。微流化处理能显著改善乳制品和酱料的质构与稳定性:在乳制品中,高压微流化能增加酪蛋白胶束的结合亲和力,提高乳饮料的黏度和稠感;在蛋黄酱中,微流化处理使粒径分布更均匀、质构更顺滑,官能品评得分上升[30]。对于苦味或涩味强的植物多酚,纳米乳和脂质体的包埋能够减少其与舌面受体的直接接触,从而掩盖苦涩味,增强饮料的可接受性[32]。同时,纳米乳的细小液滴和柔顺触感可改善口腔黏稠度和顺滑感,满足消费者对口感的要求。然而,大型设备产生的高温、强剪切或氧化环境可能导致某些天然色素和香气成分降解,引发色泽加深或风味损失。为此,生产过程中工艺参数的优化非常重要,控制均质压力和剪切次数,避

免过度能量输入；在微流化过程中采用低温循环系统减少热积累；同时，使用天然乳化剂和抗氧化剂(如磷脂、维生素 E)构建载体，既能稳定体系又可保护香味和颜色[29]。在规模化生产中，感官评测必须纳入品质控制流程，通过训练有素的感官评价小组或消费者测试来调整工艺和配方，以确保口感与风味符合市场需求。

4.4. 食品法规与标签问题

欧洲监管机构对纳米成分标识提出严格要求。欧盟食品信息条例(EU No 1169/2011)第 18(3)条明确规定，所有以“工程纳米材料”形式存在的食品成分必须在配料表中标注，并在名称后加上“[nano]”字样，以保证消费者知情。2024 年欧盟委员会提交的法规修订草案拟调整“工程纳米材料”的定义，建议只有当配料中超过 50%的颗粒尺寸小于 100 nm 时才视为纳米材料，同时排除不处于固态的粒子(如微胶束、脂质体)。欧洲议会在讨论中指出，该 50%阈值可能导致许多含有纳米颗粒的食品添加剂无需标注；法国 ANSES 等机构认为该阈值缺乏科学依据，建议采用更低的 10%阈值以提高食品安全性。此外，民间组织检测发现许多食品中的铁氧化物等添加剂含纳米颗粒，但由于缺乏监管和执行未被标注。因此，欧盟监管趋势正朝着更加严格和透明的纳米材料定义与标签要求发展。

美国食品药品监督管理局(FDA)尚未制定与欧盟类似的纳米标签制度，但发布了一系列指南强调在制造过程中使用纳米技术需评估安全性和监管状况。FDA 2014 年发布的《评估重大制造过程变化对食品成分安全和监管状态影响的指南》指出，若食品成分的生产工艺发生重大变化(如采用纳米技术)，应评估其是否影响成分性质、安全性和法规地位，并鼓励企业与 FDA 咨询。另一份针对“是否涉用纳米技术”的指南强调，纳米材料可能具有与宏观材料不同的化学、生物学或物理特性，企业在开发含纳米材料的 FDA 管理产品时，应考虑这些特性对安全性和功效的影响。总体而言，美国监管关注产品安全评估和风险管理，而未对纳米材料作出强制标识要求。

其他许多国家尚未出台专门的纳米食品标签法规，通常沿用现有食品安全体系，对任何新型成分或工艺按“新食品成分”处理，要求提供安全性数据后方可上市。在法规制定方面，应关注国际标准化组织(ISO)等机构制定的纳米材料命名和测量标准，以及各国在食品添加剂目录和食品包装材料方面对纳米材料的限制。随着消费者对纳米食品安全性的关注度提升，全球统一的法规和标签体系将成为未来趋势。

5. 挑战与前景

尽管自组装纳米技术在食品领域展现出巨大潜力，但仍面临若干挑战。首先，不同基质和消化条件下的结构-功能关系尚不清晰。自组装载体的粒径、组成和界面层与食品基质的相互作用将影响在胃肠道中的解离和再组装行为，需要借助标准化体外模型和体内试验深入研究[33]。其次，长期稳定性和贮藏条件是工业化的重要制约因素，例如 Zein 粒子在高盐或低温条件下易聚集，脂质体易氧化或粒径漂移，Pickering 乳液对颗粒润湿角分布敏感，需通过材料复合和界面工程改善[16]。但总的来说，纳米自组装技术为食品行业提供了多样化的材料和工艺工具箱。脂质体、NLC、酪蛋白胶束、Zein 纳米粒、Pickering 乳液、蛋白肽-多糖复合凝聚和超分子各具特色，可用于增溶、保护、控释和结构构建，通过选择天然可食原料和优化加工工艺，可以在满足安全与“清洁标签”要求的同时，实现功能性食品和饮料的创新开发。

参考文献

- [1] Huang, J., Zhu, Y., Xiao, H., Liu, J., Li, S., Zheng, Q., *et al.* (2023) Formation of a Traditional Chinese Medicine Self-Assembly Nanostrategy and Its Application in Cancer: A Promising Treatment. *Chinese Medicine*, **18**, Article No. 66. <https://doi.org/10.1186/s13020-023-00764-2>

- [2] Jia, H., Li, C., Li, Z., Zhao, Y., Chen, Z., Duan, J., *et al.* (2025) Knowledge, Attitudes, and Practices Regarding Food-Medicine Dual-Purpose Substances among Adults in China: A Cross-Sectional Online Survey. *BMC Complementary Medicine and Therapies*, **25**, Article No. 76. <https://doi.org/10.1186/s12906-025-04822-0>
- [3] Gao, Y., Dong, Y., Guo, Q., Wang, H., Feng, M., Yan, Z., *et al.* (2022) Study on Supramolecules in Traditional Chinese Medicine Decoction. *Molecules*, **27**, Article No. 3268. <https://doi.org/10.3390/molecules27103268>
- [4] Zhang, C., Zhao, R., Yan, W., Wang, H., Jia, M., Zhu, N., *et al.* (2016) Compositions, Formation Mechanism, and Neuroprotective Effect of Compound Precipitation from the Traditional Chinese Prescription Huang-Lian-Jie-Du-Tang. *Molecules*, **21**, Article No. 1094. <https://doi.org/10.3390/molecules21081094>
- [5] Huang, X., Wang, P., Li, T., Tian, X., Guo, W., Xu, B., *et al.* (2019) Self-Assemblies Based on Traditional Medicine Berberine and Cinnamic Acid for Adhesion-Induced Inhibition Multidrug-Resistant *Staphylococcus aureus*. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 227-237. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b17722>
- [6] Zheng, J., Fan, R., Wu, H., Yao, H., Yan, Y., Liu, J., *et al.* (2019) Directed Self-Assembly of Herbal Small Molecules into Sustained Release Hydrogels for Treating Neural Inflammation. *Nature Communications*, **10**, Article No. 1604. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09601-3>
- [7] Tian, X., Wang, P., Li, T., Huang, X., Guo, W., Yang, Y., *et al.* (2020) Self-Assembled Natural Phytochemicals for Synergistically Antibacterial Application from the Enlightenment of Traditional Chinese Medicine Combination. *Acta Pharmaceutica Sinica B*, **10**, 1784-1795. <https://doi.org/10.1016/j.apsb.2019.12.014>
- [8] Rudzińska, M., Grygier, A., Knight, G. and Kmiecik, D. (2024) Liposomes as Carriers of Bioactive Compounds in Human Nutrition. *Foods*, **13**, Article No. 1814. <https://doi.org/10.3390/foods13121814>
- [9] Sercombe, L., Veerati, T., Moheimani, F., Wu, S.Y., Sood, A.K. and Hua, S. (2015) Advances and Challenges of Liposome Assisted Drug Delivery. *Frontiers in Pharmacology*, **6**, Article No. 286. <https://doi.org/10.3389/fphar.2015.00286>
- [10] Amnuaykan, P., Anantaworasakul, P., Lueadnakrob, K., Kunkul, P., Chokrungrasrid, W., Thummanuwong, A., *et al.* (2025) Nanostructured Lipid Carriers for Sustained Release and Enhanced Delivery of Vanda Coerulea Protocorm Extract. *Pharmaceutics*, **17**, Article No. 1076. <https://doi.org/10.3390/pharmaceutics17081076>
- [11] Frias, I., Neves, A., Pinheiro, M. and Reis, S. (2016) Design, Development, and Characterization of Lipid Nanocarriers-Based Epigallocatechin Gallate Delivery System for Preventive and Therapeutic Supplementation. *Drug Design, Development and Therapy*, **10**, 3519-3528. <https://doi.org/10.2147/dddt.s109589>
- [12] Raynes, J.K., Mata, J., Wilde, K.L., Carver, J.A., Kelly, S.M. and Holt, C. (2024) Structure of Biomimetic Casein Micelles: Critical Tests of the Hydrophobic Colloid and Multivalent-Binding Models Using Recombinant Deuterated and Phosphorylated B-Casein. *Journal of Structural Biology: X*, **9**, Article ID: 100096. <https://doi.org/10.1016/j.vjsbx.2024.100096>
- [13] Liu, X., Zhang, M., Zhou, X., Wan, M., Cui, A., Xiao, B., *et al.* (2024) Research Advances in Zein-Based Nano-Delivery Systems. *Frontiers in Nutrition*, **11**, Article ID: 1379982. <https://doi.org/10.3389/fnut.2024.1379982>
- [14] Xu, D., Zhou, J., Soon, W.L., Kutzli, I., Molière, A., Diedrich, S., *et al.* (2023) Food Amyloid Fibrils Are Safe Nutrition Ingredients Based on *in-Vitro* and *in-Vivo* Assessment. *Nature Communications*, **14**, Article No. 6806. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42486-x>
- [15] Xie, Y., Liu, Q., Ge, Y., Liu, Y. and Yang, R. (2024) Formation and Applications of Typical Basic Protein-Based Heteroprotein Complex Coacervations. *Foods*, **13**, Article No. 3281. <https://doi.org/10.3390/foods13203281>
- [16] de Carvalho-Guimarães, F.B., Correa, K.L., de Souza, T.P., Rodríguez Amado, J.R., Ribeiro-Costa, R.M. and Silva-Júnior, J.O.C. (2022) A Review of Pickering Emulsions: Perspectives and Applications. *Pharmaceutics*, **15**, Article No. 1413. <https://doi.org/10.3390/ph15111413>
- [17] Ma, Y., Zheng, N., Wang, Y., Lei, H., Zhen, X., Zhang, R., *et al.* (2025) Insoluble Dietary Fiber Stabilized Pickering Emulsions as Novel Food Ingredients: Preparation, Potential Applications and Future Perspectives. *Food Chemistry: X*, **27**, Article ID: 102458. <https://doi.org/10.1016/j.fochx.2025.102458>
- [18] 钱雪丽. 金枪鱼头汤微纳胶粒结构的形成及其抗氧化作用的研究[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海海洋大学, 2019.
- [19] Yu, Z., Gao, G., Wang, H., Ke, L., Zhou, J., Rao, P., *et al.* (2020) Identification of Protein-Polysaccharide Nanoparticles Carrying Hepatoprotective Bioactives in Freshwater Clam (*Corbicula fluminea* Muller) Soup. *International Journal of Biological Macromolecules*, **151**, 781-786. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.02.105>
- [20] Wang, X., Liu, J., Ma, Y., Cui, X., Chen, C., Zhu, G., *et al.* (2023) Development of a Nanostructured Lipid Carrier-Based Drug Delivery Strategy for Apigenin: Experimental Design Based on CCD-RSM and Evaluation against NSCLC *in Vitro*. *Molecules*, **28**, Article No. 6668. <https://doi.org/10.3390/molecules28186668>
- [21] Suhandi, C., Wilar, G., Mohammed, A., Mahmoud, S., Muchtaridi, M., Shamsuddin, S., *et al.* (2025) Propolis-Based Nanostructured Lipid Carrier of α -Mangostin for Promoting Diabetic Wound Healing in Alloxan-Induced Mice. *Journal of Inflammation Research*, **18**, 7443-7457. <https://doi.org/10.2147/jir.s525243>

- [22] Elkhateeb, O., Badawy, M.E.I., Tohamy, H.G., Abou-Ahmed, H., El-Kammar, M. and Elkhennany, H. (2023) Curcumin-infused Nanostructured Lipid Carriers: A Promising Strategy for Enhancing Skin Regeneration and Combating Microbial Infection. *BMC Veterinary Research*, **19**, Article No. 206. <https://doi.org/10.1186/s12917-023-03774-2>
- [23] 尹小明, 阮文浩, 张玺, 高艺航, 黄清坤. 植物多酚在食品中的应用和研究进展[J]. 食品与营养科学, 2024, 13: 367-374.
- [24] Han, X., Xu, R., Xia, Y., Liu, Y., Chen, S., Shi, M., *et al.* (2024) Self-Assembled EGCG Nanoparticles with Enhanced Intracellular ROS Scavenging for Skin Radioprotection. *International Journal of Nanomedicine*, **19**, 13135-13148. <https://doi.org/10.2147/ijn.s488632>
- [25] Dávila-Rodríguez, M., López-Malo, A., Palou, E., Ramírez-Corona, N. and Jiménez-Munguía, M.T. (2020) Essential Oils Microemulsions Prepared with High-Frequency Ultrasound: Physical Properties and Antimicrobial Activity. *Journal of Food Science and Technology*, **57**, 4133-4142. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04449-8>
- [26] Syarifah, A.R., Tong, W., Leong, C., Tan, W., Lee, C., Razealy, M.A., *et al.* (2023) Thymol-Loaded Polymeric Nanoparticles Improve the Postharvest Microbiological Safety of Blueberries. *Food Technology and Biotechnology*, **61**, 151-159. <https://doi.org/10.17113/ftb.61.02.23.7595>
- [27] Vijayaram, S., Sinha, R., Faggio, C., Ringø, E. and Chou, C. (2024) Biopolymer Encapsulation for Improved Probiotic Delivery: Advancements and Challenges. *AIMS Microbiology*, **10**, 986-1023. <https://doi.org/10.3934/microbiol.2024043>
- [28] 苏雅婷, 钱小红, 秦伟捷. 脂质体与外泌体在药物递送和生物标志物筛选中的研究进展[J]. 色谱, 2025, 43(5): 472-486.
- [29] Elmowafy, M. and Al-Sanea, M.M. (2021) Nanostructured Lipid Carriers (NLCS) as Drug Delivery Platform: Advances in Formulation and Delivery Strategies. *Saudi Pharmaceutical Journal*, **29**, 999-1012. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2021.07.015>
- [30] Kumar, A., Dhiman, A., Suhag, R., Sehrawat, R., Upadhyay, A. and McClements, D.J. (2021) Comprehensive Review on Potential Applications of Microfluidization in Food Processing. *Food Science and Biotechnology*, **31**, 17-36. <https://doi.org/10.1007/s10068-021-01010-x>
- [31] Paliwal, R., Babu, R.J. and Palakurthi, S. (2014) Nanomedicine Scale-Up Technologies: Feasibilities and Challenges. *AAPS PharmSciTech*, **15**, 1527-1534. <https://doi.org/10.1208/s12249-014-0177-9>
- [32] Liu, Q., Huang, H., Chen, H., Lin, J. and Wang, Q. (2019) Food-Grade Nanoemulsions: Preparation, Stability and Application in Encapsulation of Bioactive Compounds. *Molecules*, **24**, Article No. 4242. <https://doi.org/10.3390/molecules24234242>
- [33] Kozu, H., Kobayashi, I. and Ichikawa, S. (2025) A Review on *in Vitro* Evaluation of Chemical and Physical Digestion for Controlling Gastric Digestion of Food. *Foods*, **14**, Article No. 1435. <https://doi.org/10.3390/foods14081435>