食品工业科技
SCIENCE AND TECHNOLOGY OF FOOD INDUSTRY
• 荷兰《文摘与引文数据库》（Scopus）
• 瑞典开放存取期刊目录 DOAJ
• 美国《化学文摘》CA
• 英国《食品科技文摘》FSTA
• 日本科学技术振兴机构数据库JST
• 世界期刊影响力指数（WJCI）报告
• 食品科学与工程领域高质量科技期刊分级目录第一方阵T1
• 北大核心期刊
• 中国精品科技期刊
• 中国科技核心期刊CSTPCD
• 中国核心学术期刊RCCSE
• 中国农林核心期刊A
• 中国生物医学Sino Med
半月刊 ISSN 1002-0306 CN 11-1759/TS 邮发代号：2-399

微胶囊技术包埋不饱和脂肪酸的研究进展

陈君玉，陈 琨，刘竞阳，饶 雷，赵 靓，王永涛，吴晓蒙，廖小军

Research Progress of Microencapsulation Technology of Unsaturated Fatty Acids

CHEN Junyu, CHEN Kun, LIU Jingyang, RAO Lei, ZHAO Liang, WANG Yongtao, WU Xiaomeng, and LIAO Xiaojun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022120173

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

沙棘籽油微胶囊的制备及氧化稳定性评价

Preparation and Oxidation Stability of Sea Buckthorn Seed Oil Microcapsules

食品工业科技. 2020, 41(20): 169-176 https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.20.027

亚油酸水合酶生物合成微生物源羟基不饱和脂肪酸的研究进展

Research Progress in Biosynthesis of Microbial Hydroxyl Unsaturated Fatty Acids by Linoleic Acid Hydratase

食品工业科技. 2021, 42(22): 449-456 https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020100119

脂肪酸不饱和度对高直链玉米淀粉-脂肪酸复合物结构和热性能的影响

Effect of Unsaturation of Fatty Acid on Structure and Stability of High Amylose Corn Starch-Fatty Acid Complex

食品工业科技. 2020, 41(3): 27-32 https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.03.006

香糟卤气味模拟物微胶囊包埋条件的优化

Optimization of Xiangzaolu simulate substance microencapsulation condition

食品工业科技. 2017(08): 233-238 https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.08.037

益生菌微胶囊技术及其在食品中的应用研究进展

Research Progress on Microcapsulation Technology and Its Application in Food

食品工业科技. 2019, 40(16): 354-362 https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.16.059

榛子油的微胶囊化工艺优化

Optimization of Microencapsulation Technology of Hazelnut Oil

食品工业科技. 2020, 41(8): 183-188 https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.08.029

关注微信公众号，获得更多资讯信息

陈君玉, 陈琨, 刘竞阳, 等. 微胶囊技术包埋不饱和脂肪酸的研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(14): 16−27. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022120173

CHEN Junyu, CHEN Kun, LIU Jingyang, et al. Research Progress of Microencapsulation Technology of Unsaturated Fatty Acids[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(14): 16−27. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022120173

·青年编委专栏—食品营养素包埋与递送（客座主编: 黄强、蔡杰、陈帅）·

微胶囊技术包埋不饱和脂肪酸的研究进展

陈君玉[1], 陈　琨[1], 刘竞阳[1], 饶　雷[1], 赵　靓[1], 王永涛[1], 吴晓蒙[1,2,*], 廖小军[1]
（1.中国农业大学食品科学与营养工程学院, 国家果蔬加工工程技术研究中心, 农业农村部果蔬加工重点实验室, 食品非热加工北京市重点实验室, 北京 100083;
2.四川成都中农大现代农业产业研究院, 四川成都 610047）

摘　要: 不饱和脂肪酸不仅对维持人体健康起着重要作用，也是功能性食品的重要原料，但其在加工和储藏的过程中容易氧化导致劣变。微胶囊化处理是一种可以有效避免不饱和脂肪酸氧化，并增强其稳定性的加工方式。本文在阐述了不饱和脂肪酸的生理功能特性及其在食品、医药等领域的用途基础上，系统梳理了用于包埋不饱和脂肪酸的微胶囊技术的研究进展，以期为相关食品的研究提供理论基础和依据。研究表明以蛋白质类和碳水化合物类为主的复合壁材是目前应用较广的壁材，将两者复配亦可避免单一壁材产生的弊端；喷雾干燥、冷冻干燥、分子包埋和凝聚法是常见的微胶囊方法。不同壁材种类和制备方法对不饱和脂肪酸的包埋率差异很大，更会影响其在加工和贮藏过程中的稳定性，研究者需根据产品性质与功能选择合适的材料与方法。微胶囊化的不饱和脂肪酸具备缓释性能，并显著提升了生理功能特性，因此在未来的食品工业中有较好的应用和发展前景。

关键词: 不饱和脂肪酸, 微胶囊, 包埋, 应用
中图分类号: TS221　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2023)14−0016−12
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022120173
本文网刊:

Research Progress of Microencapsulation Technology of Unsaturated Fatty Acids

CHEN Junyu[1], CHEN Kun[1], LIU Jingyang[1], RAO Lei[1], ZHAO Liang[1], WANG Yongtao[1], WU Xiaomeng[1,2,*], LIAO Xiaojun[1]
（1.College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, National Engineering Research Centre for Fruit and Vegetable Processing, Key Laboratory of Fruit and Vegetable Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing Advanced Innovative Center for Food Nutrition and Human Health, Beijing 100083, China;
2.CAU Sichuan Chengdu Advanced Agricultural Industrial Institute, Chengdu 610047, China）

Abstract: Unsaturated fatty acids (UFAs) play a fundamental role in maintaining human health and serve as an important raw material for functional foods. However, UFAs are prone to oxidization during processing and storage, leading to deterioration. Microencapsulation of UFAs is an effective processing method to minimize oxidation and enhance its stability. In this paper, the physiological functions of UFAs and their applications in food, medicine, and other fields are summarized. The research progress of microencapsulation technology of UFAs is systematically reviewed, aiming to provide a theoretical basis and rationale for their applications in the food industry. Research has shown that the wall materials widely used were mainly proteins and carbohydrates, whereas their combination can overcome their disadvantages. Spray drying, freeze drying, molecular encapsulation, and coacervation method are most commonly used in the fabrication of microencapsulated UFAs. Using various wall materials and fabrication methods leads to very different encapsulation efficiency, which also greatly impacts the stability of UFAs during processing and storage. Hence, it is still

收稿日期: 2022−12−20
基金项目: 四川省级财政农业改革创新科技示范奖补专项资金资助项目（SCB-ZNCY-2022006）。
作者简介: 陈君玉（1998−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 营养与食品安全, E-mail: chenjunyu9808@163.com。
*** 通信作者:** 吴晓蒙（1986−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品加工与包装, E-mail: wuxmeng@cau.edu.cn。

necessary to select appropriate materials and methods according to the properties and functions of the food products. Microencapsulated UFAs exhibited slow-release properties and improved physiological functions. Therefore, it may have broad applications and excellent future development prospects in the food industry.

Key words: unsaturated fatty acids; microencapsulation; embedding; application

脂质作为生物体必不可少的生物小分子，具有储存和提供能量及维持体温、构成生物膜等多种功能[1]。其中的基本组分是脂肪酸，它是指具有甲基端（-CH_3）和羧基端（-COOH）的碳氢链分子，按饱和程度可分为饱和脂肪酸（Saturated fatty acid, SFA）和不饱和脂肪酸（Unsaturated fatty acid, UFA）。而 UFA 根据双键的数目又可以分为单不饱和脂肪酸（Monounsaturated fatty acid, MUFA）和多不饱和脂肪酸（Polyunsaturated fatty acid, PUFA）[2]。脂肪酸大量存在于植物油、坚果以及鱼类食物中，对维持人体健康起着重要作用，以 ω-3 PUFAs 为例，UFA 具有降低高血压、恶性肿瘤、心脑血管疾病等疾病风险的作用[3]。

由于分子中双键的存在，相比于 SFA，UFA 不稳定，特别是在光照和高温环境中容易被氧化，甚至在室温下即可通过自由基链式反应氧化，且氧化速率很大程度上取决于其中双键的数量[4−5]。在食品工业中，食物中脂质的氧化会导致风味、安全和营养价值的劣变[6]，过度氧化会产生哈喇味，甚至生成醛类、酮类和碳氢化合物等致癌物质，造成严重的食品安全风险，因此采用新型食品加工技术对 UFA 进行处理，提高其在加工和储藏过程中的稳定性是现阶段得技术挑战之一，也是研究的趋势。

微胶囊技术是指用一种或多种壁材将目标物包埋的技术[7]。由于微胶囊技术具有稳定目标物质生物活性、控制释放速率、掩盖不良气味、保护敏感成分等优势[8]，已经被广泛地应用于食品工业中。近年来，随着微胶囊技术的进一步发展，越来越多的学者将目光聚集于微胶囊化油脂的研究，如图 1 所示，在 Web of Science 中搜索关键词为“unsaturated fatty acid”和“microencapsulation”的文章，最近十余年的发文数基本保持逐年上升的趋势，是研究的热点，同时是工业生产的新方向，但目前对微胶囊化的不饱和脂肪酸的研究进展多集中于 ω-3 或 ω-6 PUFAs，而缺乏对与微胶囊技术在 UFA 中的整体梳理。基于此，本文综述了不饱和脂肪酸的分类、生理功能特性和在食品、医药等领域的用途，系统梳理了微胶囊技术常用的壁材种类、制备方法及其在包埋不饱和脂肪酸中的研究进展，并对微胶囊化不饱和脂肪酸在食品工业中的应用前景进行了展望，以期为未来的研究提供思路。

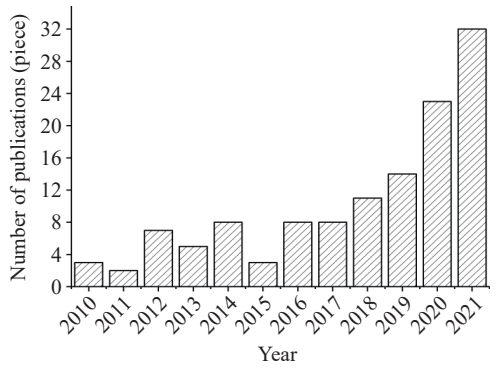

图 1　关于不饱和脂肪酸微胶囊的发文数总体趋势图

Fig.1　Overall trend chart of the number of documents issued on unsaturated fatty acid and microcapsules

注：数据来源：Web of Science。

1　不饱和脂肪酸

不饱和脂肪酸的特点是在分子中有一个或几个双键，主要存在于天然的食物以及各种加工制品中，如坚果、海鱼、橄榄油、花生油、玉米油等[9]。不同脂肪酸之间的主要区别在于碳原子数目、双键数量和位置的不同。其表示方法一般从甲基碳 ω 开始编号至第一个双键位置，如亚油酸（Linoleic acid, LA, C18:2ω-6）表示含 18 个碳原子，2 个不饱和键，第 1 个双键从甲基端数起在第 6 碳和第 7 碳之间[10]。常见不饱和脂肪酸的分类、化学结构及食物中的来源如图 2 所示。其中 MUFA 是指含有 1 个双键的不饱和脂肪酸，一般天然 MUFA 的碳链拥有 14~22 个碳原子，包括油酸（Oleic acid, OA）、棕榈油酸、反棕榈油酸、肉豆蔻油酸，以及对人体有害的反式油酸和芥酸等物质。PUFA 是指含有两个及以上双键的碳原子数为 18~22 的直链脂肪酸，根据第一个不饱和双键在碳链甲基端出现位置的不同，可分为 ω-3 和 ω-6 系列 PUFAs。

大量研究表明，UFA 对维持人体健康起着重要作用，且对人类多种疾病具有明显的预防和治疗作用。一方面，它能增加胆固醇代谢，抑制内源性胆固醇和甘油三酯的合成，降低血液中对人体有害的胆固醇和甘油三酯（Triglyceride, TG）含量，从而有效控制人体血脂的浓度，提高对人体有益的高密度脂蛋白的含量[11−12]，降低心血管疾病的发病率，在调解血脂、血糖、血压等方面有良好的效果；同时，在生命早期摄入足量 ω-3 PUFAs，不仅对于保证胎儿及婴幼儿的正常生长发育至关重要[12]，还有助于预防儿童青少年期注意力缺陷多动障碍、哮喘及过敏性疾病、高脂血症、非酒精性脂肪肝等慢性非感染性疾病的发生[13]。另一方面，它能提高肿瘤对药物的敏感性[14]，有效降低癌症的风险；此外，PUFA 可通过作用于巨噬细胞改善机体的免疫作用，降低炎症反应[15]，同时 ω-3 PUFAs 还具有保护心脏和神经、抗过敏、防止皮肤

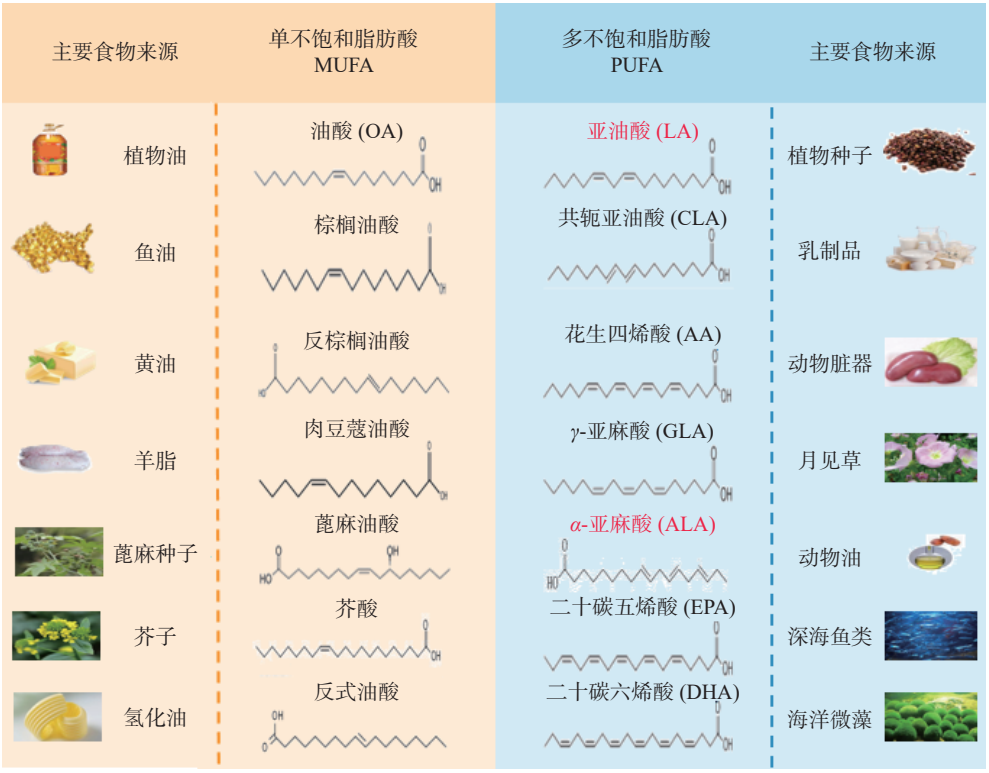

图 2　不饱和脂肪酸种类及其主要来源示意图

Fig.2　Types and main natural sources of unsaturated fatty acids

老化、预防老年性痴呆以及抗抑郁等多种作用[12]。

基于 UFA 对于人体健康的重要作用，富含 UFA 或者人工添加 UFA 的食品、保健品、化妆品成为研发的热点。在食品中，PUFA 常被作为营养强化剂添加到食品中，如婴幼儿配方食品、DHA 软糖[16] 以及添加 PUFA 的鱼肉香肠、汉堡包、调料、豆腐、蛋黄酱、面包、糖果、食用油等食品[3] 等，应用前景可观。市面上的医药保健品中，以降血脂、预防心血管疾病为主要功效的 UFA 保健食品比比皆是，最常见的是富含二十碳五烯酸(Eicosapentaenoic acid, EPA)和二十二碳六烯酸(Docosahexaenoic acid, DHA)的鱼油产品[16]。在日化产品中，PUFAs 被称为“美容酸”，常常被用来改善皮肤和头发状态[3]，以 OA 为主要成分的山茶油，因具有抗氧化、防晒、锁水保湿等多种功效，也被广泛用作生产护肤品的基底油。

UFA 由于双键的存在，在贮藏和加工过程中稳定性差，易受到热、氧气、光照、微生物、酶、金属离子等影响而发生氧化，同时油脂氧化生成的一级氧化产物可进一步发生氧化裂解形成包括醛类、酮类、醇类和烃类化合物等二级氧化产物，导致油脂变质，产生异味、酸败，甚至生成有毒物质[17−18]。ω-6 PUFAs 的氧化产物 4-羟基壬烯醛会干扰细胞正常功能、损伤细胞组分，同时内源性 4-羟基壬烯醛还与动脉粥样硬化、老年痴呆等疾病密切相关[19]。氧化会破坏 EPA、DHA 的结构而导致其特有的生理作用消失，EPA 和 DHA 氧化形成的三烯癸醛，是构成“哈喇味”的主要成分，而且氧化过程中产生的过氧化物和自由基也对人体有害[18]。研究还发现，顺式不饱和脂肪酸在热加工过程中可经异构化反应形成对人体有害的反式脂肪酸[20]。因此在加工和储藏过程中控制 UFA 的氧化是保证其品质和营养价值的前提。

目前常用的控制方法包括添加抗氧化剂、充氮储存、避光、避热、低温储存、真空储存等。常用抗氧化剂中维生素 E 抗氧化效果很不稳定，特丁基对苯二酚、丁基羟基茴香醚等抗氧化剂也存在安全风险[18,21]，充氮储存虽然可以避免抗氧化剂带来的安全问题，但其效果也受到储存温度、充氮程度、氮气纯度等因素的影响[22]；避光、避热、低温储存、真空储存等储存方法均不能从根本上解决问题，一方面，在加工过程中油脂仍不可避免与空气接触，贮藏时间不能过久，另一方面空气中的氧分子在非极性的脂类物质中仍有一定的溶解度，这部分溶氧很容易使产品过氧化值超标[18,23−24]。因此，如何合理得保存 UFA，并将其应用于食品中，仍是亟待解决的科学难题。

2　微胶囊化技术

微胶囊化是指将固体、液体或气体等作为芯材包埋或固化在天然或合成高分子材料壁材中的过程[25−27]，微胶囊的粒径通常在 1~1000 μm 之间[28]。用壁材将芯材完全包覆起来，不对芯材原有性质产生损害，然后在某些外部刺激或缓释作用下使芯材的功能再次呈现出来[29]。采用微胶囊技术包埋油脂类物质拥有重多优点。首先，液体的芯材在加工成微胶囊产品后会转变为固体粉末，方便运输及使用。其次，芯材被包裹后可以隔绝光照、氧气等外界环境的影响，对于维持其生物活性、提升稳定性有着积极地作用。此外，芯材的释放程度可以通过多种手段进行控

制，达到缓释或者刺激响应释放的目的。因此，利用微胶囊技术包埋 UFA 等物质，开发食品添加剂、营养强化剂等产品，可以满足食品工业的需要[28−30]，具有良好的应用前景。

2.1　微胶囊壁材

微胶囊壁材的选择对于芯材生物利用度的影响很大，理想的壁材不仅不能与芯材发生化学反应，同时针对不同的应用场景，要有适当的机械强度、溶解性、稳定性、乳化性、渗透性等特点，并且在食品工业中，还要求其符合安全卫生的要求[31−33]。油脂微胶囊的芯材多为脂溶性，因此应选择水溶性强的壁材制备微胶囊乳液。其常见壁材可以分为碳水化合物类、蛋白质类和胶体类这三大类物质。淀粉、壳聚糖、阿拉伯胶等都是常用的碳水化合物类壁材，此类壁材具有较好的溶解性、较低的黏度，且来源广泛、价格低廉，但是用其制备的微胶囊对于油脂类物质的包埋率和载荷量都较低，效率十分有限[34]。常见的蛋白质类壁材包括玉米醇溶蛋白、明胶、大豆分离蛋白、乳清蛋白等，它们具有较好的乳化作用，一定程度上能够提高油脂的包埋率，但制备的微胶囊的功能特性易受 pH、温度、离子强度等外界环境的影响[35−36]。包括卡拉胶、果胶、黄原胶等在内的胶体类壁材，具有良好的成膜性，且能提高乳液的稳定性和均一性，但其浓度过高易导致液体粘度增加，且成膜后易氧化，形成的微胶囊含水量大[35,37]。单一壁材在使用时有一定的局限性，而且包埋效率较低，稳定性、成膜性较差，因而在实际生产中往往对这几类壁材复配以发挥协同增效作用，提高微胶囊的包埋率及稳定性。同时，壁材在一定程度上能影响微胶囊的缓释、包埋、应用等效果，因此在选择微胶囊壁材时，在满足壁材与芯材不发生反应且相容性好的前提下，需要综合考虑壁材的稳定性、传质性能、来源和价格、机械强度、渗透性等因素。

2.2　微胶囊方法

微胶囊的制备技术亦称为包埋技术，其关键点在于微胶囊壁材和制备方法的探究，制备方法的选择与微胶囊壁材的性质密切相关，且因目标功能和应用场景的多样，所以在实际生产中应根据壁材与芯材的性质特点、应用场景等因素综合考虑，选择合适的方法。其主要分为物理法、化学法及物理化学法三大类，其中物理法主要包括喷雾干燥法、空气悬浮法、喷雾冻凝法、冷冻干燥法、挤压法等，化学法包括原位聚合法、界面聚合法等，物理化学法包括锐孔-凝固浴法、凝固法等[38]。但在食品工业中，不仅要求微胶囊的壁材和芯材要符合食品标准，而且能够实现连续化生产、生产成本较低、对环境友好等[39]。因而喷雾干燥法、冷冻干燥法、分子包埋法和凝聚法等是其主要应用方法。表 1 列举了这几种方法的原理、优缺点、常用壁材以及相关应用。

2.2.1　喷雾干燥法　喷雾干燥法是微胶囊技术中应用最广泛的方法，它通过将芯材与壁材混合形成稳定乳液后，利用喷雾干燥高压雾化物料，依托雾滴运动时与热气流的速度差，高温除去水分，固化壁材而聚合成粉末[40]。喷雾干燥法常用的壁材主要是大豆分离蛋白、乳清蛋白、麦芽糊精、阿拉伯胶等[41]。此方法成本低、处理量大，适用于工业化连续作业，同时生成的微胶囊体积小、稳定性高，已经在工业上得到了广范的使用。但是因干燥过程处于高温环境，容易对芯材的生物活性成分造成破坏，导致其应用受限，且雾滴粘壁严重易造成产量损失、成本浪费，同时制备的微胶囊也存在均匀性差的问题[34,42]。

2.2.2　冷冻干燥法　冷冻干燥法是指将含有壁材和芯材的均匀乳液预冻结后，在真空、低压条件下使乳液中水分升华，制成微胶囊粉末的过程[40]。因制备过程温度低，有效避免了油脂氧化[43]，可用于热敏性物

表 1　食品工业中常见的微胶囊技术

Table 1　Common microencapsulation technologies in food industry

方法	原理	优点	缺点	常用壁材	应用	参考文献
喷雾干燥法	将芯材与壁材混合形成稳定乳液后，利用喷雾干燥高压雾化物料后，依托雾滴运动时与热气流的速度差，高温除去水分，固化壁材而聚合成粉末	成本低，微胶囊质量高、体积小、稳定性高	雾滴粘壁严重造成产量损失、成本浪费，微胶囊均匀性差，壁材选择受限，不适用于热敏性物质	大豆分离蛋白、乳清蛋白、麦芽糊精、阿拉伯胶等	糖果，奶粉，速溶甜点，食品香料，速溶饮料，植物油、海洋油胶囊	[34,40−42,50]
冷冻干燥法	乳液预冻结后，利用真空冷冻使乳液中水分升华，氮气干燥，制成微胶囊粉末	制备过程温度低，避免油脂氧化	需要预冻，工艺复杂，对设备要求高，生产成本较高，包埋效率较低，干燥后产品为块状且易形成冰晶，需要粉碎过筛	壳聚糖、β-环糊精等	鱼油微胶囊、植物油微胶囊	[40,43−44,51]
分子包埋法	利用具有特殊分子结构的壁材进行包埋。在分子水平上多数以β-环糊精为壁材，疏水分子为芯材，利用氢键、范德华力、疏水作用等连接芯材和壁材，干燥得到微胶囊产品	工艺简单，操作方便，环境友好，原料便宜易得	要求大小合适的芯材才能被包埋	β-环糊精	香精、色素、维生素	[32,40,45−46]
凝聚法（单凝聚法、复凝聚法）	将芯材分散在高分子材料壁材水溶液中。在一定条件下，利用带相反电荷的高分子材料互相交联复合或加入凝聚剂，溶解度降低，聚合物自溶液中凝聚析出而成微胶囊	过程温和，能避免芯材的活性损失，工艺过程简单，芯材易释放	受温度、含盐量等外界因素影响而要求芯材必须是脂溶性的；处理样品少，不适合工业化生产	明胶、阿拉伯胶、海藻酸钠、壳聚糖、果胶、琼脂、卡拉胶等	精油微胶囊，植物油、海洋油胶囊	[26,46−50,52]

质。但该方法需要预冻，工艺复杂，对设备要求高，其不仅生产成本较高且制备的微胶囊包埋效率较低[40]，同时因干燥后产品为块状且易形成冰晶，导致壁材表面形成空洞，微胶囊需要粉碎过筛[44]。

2.2.3 分子包埋法 分子包埋法又称包合法、包接络合法，它主要是利用具有特殊分子结构的壁材进行包埋，在分子水平上多以 β-环糊精作为壁材，疏水的油脂分子为芯材，利用氢键、范德华力、疏水作用等连接芯材和壁材，干燥后得到微胶囊产品[32,45]。分子包埋法工艺简单，操作方便，环境友好，原料便宜易得，但是对于芯材分子的大小要求较高[40,46]。

2.2.4 凝聚法 凝聚法又称相分离法，是通过将芯材分散在高分子材料壁材水溶液中，利用带相反电荷的高分子材料互相交联复合或凝聚剂的作用，使芯材的溶解度降低，自溶液中凝聚析出而成微胶囊[45−47]。根据凝聚剂的不同，又可分为单凝聚法和复凝聚法两种。这种方法反应过程温和，能避免芯材的活性损失，且工艺过程简单，芯材易释放。但是反应的过程易受温度、含盐量等外界因素影响，因为能同时处理样品少，不易于进行工业化生产[48−49]。

3 微胶囊技术在不饱和脂肪酸中的研究现状

利用微胶囊技术包埋不饱和脂肪酸的主要目的是保护其免受环境应激如热、光、氧和湿度的不利影响，尽可能避免其在加工和储藏过程氧化导致油脂酸败等反应[53]，因此，微胶囊化油脂后，应对其包埋效率、抗氧化性、缓释效果、生理功能、应用性能进行评估，以确保其配方的正确性以及在递送体系中的有效性[54]。表 2 为目前国内外利用微胶囊技术包埋不饱和脂肪酸的研究进展。下面从包埋效率、抗氧化性、缓释性能、生理功能及应用效果的角度进行阐述。

3.1 微胶囊化不饱和脂肪酸的包埋效率

3.1.1 不同微胶囊壁材对不饱和脂肪酸包埋效率的影响 壁材种类是影响微胶囊包埋效率的主要因素，

表 2 目前国内外利用微胶囊技术包埋不饱和脂肪酸的研究进展

Table 2 Summary of studies on the microencapsulation of unsaturated fatty acids at home and abroad

制备方法	壁材	包埋物质	包埋率(%)	氧化稳定性	缓释效果	生理功能	参考文献
真空干燥法	β-环糊精	柚子籽油	92.18	20 ℃下贮藏期从28 d延长至130 d	–	–	[7]
分子包埋法	环糊精(α-环糊精、β-环糊精、γ-环糊精)	CLA	12.6~35.8	35 ℃下贮藏80 h后，复合物的氧含量与对照组无明显差别，未包埋油脂的顶空氧从8.1 mmol/L降至3.7 mmol/L	–	–	[63]
	直链糊精	CLA	3.30~6.05	63 ℃贮藏10 d后，复合物POV无明显变化，产品颜色保持不变，而未包埋油脂POV在3 d超过35 meq/kg	在模拟胃液中2 h累积释放率仅为8%，而在模拟肠液中12 h内即可达到89.5%的释放，12 h后缓慢释放达到96.1%	–	[67]
	β-环糊精	CLA	92.18	常温下，贮藏期从74 d延长至182 d	–	–	[66]
超声波辅助分子包埋法	β-环糊精	榛子油	69.18	微胶囊在60 ℃可贮藏25 d，而在常温下可贮藏400 d，远长于未包埋油脂的200 d	在模拟胃液中释放量仅为38.34%，但在进入模拟肠液4 h后，释放量达到近80%	降血脂功能：有效降低了血清中的TC、TG、LDL-C的水平，抑制了HDL-C的降低，促进了体内血脂的代谢，有效缓解了脂质堆积对小鼠肝细胞的损伤，且微胶囊效果优于液态油脂	[44]
	壳聚糖、乳糖	蚕蛹油	83.31	–	在模拟胃液中4 h累计释放量仅为50%，而在模拟肠液中1 h释放量接近70%	–	[84]
喷雾干燥法	辛烯基琥珀酸酯化淀粉、麦芽糊精	CLA	93.7~94.1	20 ℃、23% RH贮藏8周，微胶囊POV<10 mmol/kg，远低于未包埋CLA的65 mmol/kg	–	–	[57]
	阿拉伯胶、麦芽糊精	ALA	92.8~95.8	65 ℃贮藏32 d，微胶囊的POV从初始的1.08 mmol/kg升至10.08 mmol/kg；以6 mmol/kg为上限，可在22 ℃贮藏2年	–	–	[68]
	阿拉伯胶、麦芽糊精	余甘子核仁油	90.74	100 ℃下，微胶囊氧化诱导时间为22.16 h，显著高于未包埋油脂的2.78 h，25 ℃下贮藏期从128 d延长至716 d	–	–	[75]
	OSA淀粉、菊糖、麦芽糊精和壳聚糖	微藻油	98.57	室温下贮藏期由原来的160 d延长至368 d，且DHA保留率达到61.43%，是未包埋油脂的2.65倍	在模拟胃液中释放率仅为4.24%，而在模拟肠液中释放量达到52.12%	–	[69]
	辛烯基琥珀酸酯化淀粉、麦芽糊精	AA	63~90.6	–	–	–	[29]

续表 2

制备方法	壁材	包埋物质	包埋率(%)	氧化稳定性	缓释效果	生理功能	参考文献
	酪蛋白酸钠、明胶、麦芽糊精	ALA	80.12	60 ℃下贮藏7 d后, 微胶囊的POV仅为1.435 g/100 g, 显著低于未包埋油脂的12.62 g/100 g	–	降血脂功能: 降低高脂HepG2细胞TC、TG、LDL-C含量, 升高HDL-C含量; 抗癌作用: 提高19.89%的HepG2细胞凋亡率, 并上调细胞的早期凋亡和晚期凋亡比例, 具有一定的促进肝癌细胞死亡的效果	[85]
	辛烯基琥珀酸淀粉酯、黄原胶	CLA	>97	50 ℃贮藏70 h后, 顶空氧消耗量约为对照组的1/3	在模拟胃液中释放率仅为3.6%~6.1%(w/w), 而在模拟小肠液中可达到50.1%	–	[70]
	酪蛋白酸钠、乳清蛋白、麦芽糊精		91.38~98.1	在45 ℃、30% RH下贮藏30 d后POV值仅为0.2852 g/100 g	–	–	[87]
	变性淀粉CO-01、酪蛋白、蔗糖		93.26	62 ℃贮藏45 d, 微胶囊POV为4.08 meq/kg, 而未包埋油脂为40.31 meg/kg	–	–	[88]
	乳清蛋白、麦芽糊精	母乳类似物(OA、LA、ALA)	93.02	在60 ℃贮藏10 d后, 微胶囊POV为13.76 meq/kg, 几近未包埋油脂40.65 meq/kg的1/3; 贮藏期从91 d延长至198 d	–	–	[72]
	大豆分离蛋白、麦芽糊精、阿拉伯胶	核桃油	75.69	–	缓释效果: 在模拟胃液中2 h释放率仅为10%~15%, 而在模拟肠液中2 h就达到91.13%, 具有良好的缓释效果	降血脂功能: 缓解了高脂小鼠体重、肝脏指数的升高, 提高了血清中HDL-C水平, 降低了TC、LDL-C水平, 同时使高脂模型小鼠肝脏损伤得到有效缓解, 体内分解效率提高, 生理功能显著	[35]
	乳清浓缩蛋白、麦芽糊精	CLA	86.9~90.6	20 ℃、23% RH贮藏8周, 微胶囊POV<10 mmol/kg, 远低于未包埋CLA的65 mmol/kg	–	–	[57]
	大豆分离蛋白、麦芽糊精	枸杞籽油	88.55	可在20 ℃贮藏240 d, 而未包埋油脂在60 ℃贮藏6 d时POV已超出食用油卫生标准的要求	–	–	[73]
	大豆分离蛋白、麦芽糊精	奇亚籽油	93.79	25 ℃下贮藏期从20 d延长至136 d, 在65 ℃贮藏6 d, ALA仍保留54.64%	–	–	[79]
复合凝聚法	大豆分离蛋白、麦芽糊精	猕猴桃籽油	93.78	20 ℃下, 贮藏3个月, 油脂保留率在93%~99%之间, 贮藏一年半后, 仍能保留近50%		–	[81]
冷冻干燥法	酪蛋白酸钠、D-乳糖水合物	奇亚籽油	90.65	贮藏期从105 d延长至219 d	在整个消化过程里释放率达81.73%, 在模拟胃液中释放率仅为29.99%, 而在模拟肠液中释放率达到51.74%	–	[74]
挤出法	琼脂、蜡质玉米淀粉	CLA	>95	35 ℃贮藏100 h后, 微胶囊的POV为20 mequiv./kg, 显著低于对照组的316 mequiv./kg	–	–	[71]

碳水化合物类和蛋白质类是目前应用较多的微胶囊壁材, Jimenez 等[55] 研究发现以乳清浓缩蛋白为壁材包埋 CLA 时的包埋率为 89.60%, 而阿拉伯胶仅为 56.20%。庄丰辰等[56] 的研究表明以牛乳浓缩蛋白包埋 CLA(Conjugated linoleic acid, CLA)时包埋率为 53.7%, 显著低于乳清浓缩蛋白包埋 CLA 时的包埋率 69.5%。张中义等[57] 利用辛烯基琥珀酸酯化淀粉包埋 CLA 其效率达到 93.7%, 显著高于单一壁材乳清浓缩蛋白包埋时的 86.9%, 当辛烯基琥珀酸酯化淀粉和麦芽糊精形成复合壁材时其包埋效率提高至 94.5%, 证明复合壁材微胶囊的包埋效果要优于单一壁材。Costa 等[58] 的实验也进一步证实该结论, 通过将不同壁材组合, 以相同工艺参数包埋 CLA, 制得的微胶囊具有不同的包埋率, 若以单一壁材豌豆浓缩蛋白包埋 CLA, 包埋率为 14.7%; 当以复合壁材麦芽糊精和豌豆浓缩蛋白包埋时其 CLA 包埋率为 36.4%; 而以羧甲基纤维素和豌豆浓缩蛋白为复合壁材时其包埋效率可达到 40.6%。杨婷茹[59] 以大豆分离蛋白和麦芽糊精为复合壁材包埋葡萄籽油, 其包埋效率为 85.6%, 以变性淀粉和麦芽糊精为复合壁材时, 其包埋效率为 88.4%, 当以阿拉伯胶和麦芽糊精为复合壁材时其包埋率可达到 92.3%。因单一蛋白质壁材不仅包埋效率较低, 同时, 蛋白质因存在疏水性基团易聚集且能被胃蛋白酶水解, 在贮藏和递送方面受到限制[60−61], 而单一碳水化合物壁材成膜性和乳化性较差, 需要进行化学改性以达到使用要求[62], 将两者复配是现在应用较为广泛的组合, 可以避免单一壁材产生的弊端。

3.1.2 不同微胶囊方法对不饱和脂肪酸包埋效率的影响 微胶囊方法是影响不饱和脂肪酸包埋效果的另一因素。当同样使用 β-环糊精为包埋壁材时，不同包埋方法的效率具有显著差别。Park 等[63] 以分子包埋法包埋 CLA，其包埋效率最高仅可达到 35.8%；罗鹏等[64] 改用喷雾干燥法包埋打瓜籽油，其包埋效率为 52.8%；张维[44] 以超声波辅助分子包埋法包埋榛子油时，包埋率可达 69.18%；而肖小年等[7] 以真空干燥法包埋柚子籽油，包埋率提高至 92.18%。但王春玉等[65] 同样以分子包埋法包埋橄榄油，其包埋率为 76.2%；郭烨[66] 以分子包埋法包埋柚子籽油，其包埋率为 92.18%。可见，包埋效率不仅受到微胶囊方法的影响，还和包埋物质的种类有关，因此，需要根据实际的生产及应用选择合适的微胶囊方法。

3.2 微胶囊化不饱和脂肪酸的抗氧化性

研究发现，微胶囊化不仅能对产品进行较好的保护，同时能提升其氧化稳定性、延长油脂贮藏期，其抗氧化性主要受到壁材种类和制备方法影响。

3.2.1 不同微胶囊壁材对不饱和脂肪酸抗氧化性的影响 研究发现，以淀粉、环糊精等碳水化合物为单一壁材包埋脂质时，两者易形成淀粉-脂质复合物以对抗油脂的氧化。Park 等[63] 以分子包埋法制备 CLA/α-环糊精、CLA/β-环糊精和 CLA/γ-环糊精包涵体复合物，在 35 ℃ 下贮藏 80 h 后，CLA 的顶空氧从 8.1 mmol/L 降至 3.7 mmol/L，而复合物的氧含量与对照组无差别，表明复合物的形成可以成功阻止 CLA 在 35 ℃ 下诱导的氧化；常情情[67] 利用分子包埋法制备 CLA/直链糊精复合物，CLA 在 63℃ 贮藏 3 d 后，过氧化值（Peroxide value, POV）甚至超过 35 meq/kg，而复合物储存 10 d 后，其 POV 无明显变化，产品的颜色也保持不变，说明 CLA/直链糊精复合物完全保护了 CLA 免受氧化，这表明微胶囊壁材作为物理屏障，起到减缓 CLA 氧化过程的作用。

因单一壁材的局限性，复合壁材是大势所趋。以多种碳水化合物类物质组合成的复合壁材如阿拉伯胶和麦芽糊精，使得 ALA 在 63 ℃ 贮藏 32 d，其 POV 仅从 1.08 mmol/kg 上升至 10.08 mmol/kg[68]；辛烯基琥珀酸淀粉酯淀粉、菊糖、麦芽糊精和壳聚糖制备的微藻油微胶囊，在室温下可将微藻油的贮藏期由 160 d 延长至 368 d[69]。何慧子[70] 以将碳水化合物类壁材辛烯基琥珀酸淀粉酯淀粉与胶体类壁材黄原胶复配制备的 CLA 微胶囊，在 50 ℃ 贮藏 70 h 后，顶空氧消耗量仅为 CLA 的 1/3；Lee 等[71] 以琼脂和蜡质玉米淀粉为壁材时，在 35 ℃ 处理 100 h 后，CLA 微胶囊的 POV 仅为 20 meq/kg，而游离 CLA 含量达到 316 meq/kg，可见，包埋后 CLA 氧化稳定性提高，同时，微胶囊化油脂可以提高 UFA 的氧化稳定性。

因单一碳水化合物类壁材存在包埋率的问题，而蛋白类壁材因具有乳化作用，一定程度上能够提高油脂的包埋率，因而经常将二者复配制备复合壁材。张中义等[57] 以辛烯基琥珀酸酯化淀粉、乳清浓缩蛋白和麦芽糊精为壁材制备的微胶囊在 20 ℃、23% RH 下贮藏 8 周后，微胶囊 POV<10 mmol/kg，远低于未包埋 CLA 的 65 mmol/kg；赵亚东[72] 利用乳清蛋白和麦芽糊精对富含 OA、LA 以及 ALA 的母乳类似物进行包埋，发现在 60 ℃ 贮藏 3 d 其 POV 仅为 2.38 meq/kg，仅比起始值 1.39 meq/kg 增加不到 1 meq/kg，而未包埋样品达到 9.28 meq/kg，贮藏 10 d 后，未包埋样品的 POV 为 40.65 meq/kg，几近微胶囊产品的 3 倍，油脂的贮藏期从 91 d 延长至 198 d，且 POV<20 meq/kg；马晓燕[73] 以大豆分离蛋白、麦芽糊精为壁材包埋枸杞子油，油脂氧化速率显著减缓，在 20 ℃ 下可贮藏 240 d，而枸杞子油在 60 ℃ 下贮藏 6 d，其 POV 值已超出食用油卫生标准的要求；常馨月[74] 以冷冻干燥法酪蛋白酸钠和 D-乳糖水合物为壁材制备的微胶囊可将奇亚籽油的贮藏期从 105 d 延长至 219 d；葛双双[75] 以喷雾干燥法阿拉伯胶和麦芽糊精为壁材包埋余甘子核仁油，发现在 100 ℃ 下，微胶囊氧化诱导时间为 22.16 h，几近未包埋油脂的 8 倍，且微胶囊在 25 ℃ 可将油脂的贮藏期从 128 d 延长至 716 d，微胶囊后油脂的氧化和贮藏稳定性得到显著提高。以蛋白质类和碳水化合物类为主的复合壁材是目前的研究热点，一方面，因蛋白质分子带有许多双亲基团，当其与油滴接触时，疏水基团吸附在油滴表面，而亲水基团深入水相，紧密结合水和油，形成乳化液，而加入碳水化合物类后，在一定程度上可替代蛋白质部分失水，甚至可以嵌入蛋白质基质中，提高蛋白膜稳定性，增加微胶囊膜的厚度、强度和致密度，具有优异的抗氧化性[76−77]。

3.2.2 不同微胶囊方法对不饱和脂肪酸抗氧化性的影响 微胶囊方法的选择是影响油脂氧化性的另一因素。Zhou 等[78] 以喷雾干燥法制备的核桃油微胶囊相比于未包埋油脂具有更低的 POV 和氧化速率，能显著提高油脂的氧化稳定性；韩婕妤等[79] 以喷雾干燥法制备的奇亚籽油微胶囊将油脂在室温下的贮藏期从 20 d 延长至 136 d；邓叶俊等[80] 以喷雾干燥法制备的皱皮木瓜籽油微胶囊 65℃ 下贮藏 18 d 时（相当于货架期室温 18 个月）POV 仍在适合食用值（7.5 mmol/kg）以下，而未包埋油脂在 12 d 时，POV 就达到 17.7 mmol/kg，致密的微胶囊壁阻碍了氧气与微胶囊中油脂接触，使其氧化速度始终低于未包埋油脂，大大延长了油脂的贮藏期，提高了油脂氧化稳定性；潘梦婷[81] 利用复合凝聚法制备的猕猴桃籽油微胶囊在 20 ℃ 下贮藏 3 个月后，油脂的保留率在 93%~99% 之间，贮藏一年半后，仍能保留近 50%。郭烨[66] 以分子包埋法包埋柚子籽油，将油脂在常温下的贮藏期从 74 d 延长至 182 d，而张维[44] 利用超声波辅助分子包埋法制备的榛子油微胶囊能在常温下将液态油脂的贮藏期从 200 d 延长至 400 d，可能是声波产生的空化作用进一步促进了壁材与芯材

的相互作用，而使其包埋更为彻底[82]，而在贮藏期间不易被氧化。喷雾干燥法因具有成本低、操作简单、制备产品稳定性好、可大规模生产等优点，是目前研究和应用较多的一种油脂微胶囊化方法[83]，但实际生产时仍需要根据产品目的功能进行适配选择合适方法。

3.3　微胶囊化不饱和脂肪酸的缓释性能

随着技术的发展，基于人体生理学的体外消化模型已被开发为简单、廉价和可重复利用的工具，可用于研究微胶囊的递送效果[54]。研究发现，微胶囊化油脂具有较好的缓释效果。常情情[67] 制备的 CLA/直链糊精复合物在模拟胃液中显示 CLA 的累积释放率非常低，反应 2 h 仅有 8% 的 CLA 被释放，而在模拟肠液中 12 h 内即可达到 89.5% 的释放，12 h 后缓慢释放达到 96.1%；何慧子[70] 制备的 CLA 微胶囊也证明具有相同的效果，在模拟胃液中仅为 3.6%~6.1%(w/w)，而在模拟小肠液中，CLA 的释放率甚至可达到 50.1%，并通过荧光标记示踪法间接测定 CLA 在大鼠消化道内转运情况，证明了 CLA 主要在小肠中释放；陈晨[84] 以壳聚糖和乳糖为壁材制备的蚕蛹油微胶囊，在模拟胃液中 4 h 累计释放量仅为 50%，而在模拟肠液中 1 h 释放量接近 70%；同时，戚登斐[35] 的研究表明，核桃油胶囊在模拟胃液中 2 h 释放率仅为 10%~15%，而在模拟肠液中 2 h 就达到 91.13%。综上所述，利用微胶囊技术，能进一步控制不饱和脂肪酸在人体内的释放，达到缓释效果，微胶囊后的产品可作为靶向传递系统，进一步提高油脂在人体内的生物利用率，一方面，因油脂受壁材保护且胃液中缺少脂肪酶，而进入肠道的微胶囊进一步受到胰脂肪酶作用，促进油脂的释放分解；另一方面，微胶囊化后油脂具有更小尺寸，壁材分解使得油脂以较小尺寸接触脂肪酶，脂解效率得以提高[35,84]。

3.4　微胶囊化不饱和脂肪酸的生理功能

因不饱和脂肪酸具有较好的生理功能，同时可以进行体内试验如动物实验等，以确定微胶囊化油脂的药理学、功效和毒性[54]，研究证明，微胶囊化油脂不仅具有液态油脂的生理功能且优于液态油脂。戚登斐[35] 利用不同剂量的核桃油及其微胶囊灌胃干预高脂小鼠，有效缓解了小鼠体重、肝脏指数的升高，提高了血清中高密度脂蛋白胆固醇(High density lipoprotein cholesterol, HDL-C)水平，降低了总胆固醇(Total cholesterol, TC)、低密度脂蛋白胆固醇(Low density lipoprotein cholesterol, LDL-C)水平，同时使高脂模型小鼠肝脏损伤得到有效缓解，体内分解效率提高，生理功能显著；张维[44] 利用榛子油及其微胶囊灌胃小鼠 4 周，发现其有效降低了血清中的 TC、TG、LDL-C 的水平，抑制了 HDL-C 的降低，促进了体内血脂的代谢，研究还发现，血脂中 TG 和 TC 降低水平的高低可以通过调节榛子油及其微胶囊的剂量得以实现，此外，榛子油及其微胶囊还能有效缓解脂质堆积对小鼠肝细胞的损伤，且微胶囊效果优于液态油脂；王亚[85] 通过细胞实验对 ALA 微胶囊的降血脂及抗癌活性进行研究发现，ALA 微胶囊能降低高脂 HepG2 细胞 TC、TG、LDL-C 含量，升高 HDL-C 含量，并提高 19.89% 的 HepG2 细胞凋亡率，并上调细胞的早期凋亡和晚期凋亡比例，具有一定的促进肝癌细胞死亡的效果，具有较好的抗癌作用；钱俊青等[86] 对 ICR 小鼠连续灌胃 4 周富含 DHA 和 EPA 的 PUFAs 微胶囊，发现微胶囊能改善小鼠的空间学习以及条件学习记忆水平，均略优于液态不饱和脂肪酸组。因此，将不饱和脂肪酸进行微胶囊化后具有更好的生理功能特性。

3.5　微胶囊化不饱和脂肪酸的应用效果

基于微胶囊化油脂的各种优点，研究者对其在食品中的具体应用进行探索。姚运辉[87] 利用酪蛋白酸钠、乳清蛋白、麦芽糊精包埋花生四烯酸(Arachidonic acid, AA)，在 45 ℃、30% RH 下进行加速实验发现 30 d 后 POV 值仅为 0.2852 g/100 g，并将其应用于配方奶粉，发现在 37~40 ℃ 储存 3 个月后，其中的 AA 含量仅降低 1.3 mg/100 g；刘灵莉[29] 利用辛烯基琥珀酸酯化淀粉和麦芽糊精包埋 AA，并将其应用于制备婴幼儿配方奶粉，在 25~150 ℃ 处理 30 min，其含量无明显变化，稳定性较好，于 37~40 ℃、75% RH 贮藏 3 个月后，经微胶囊的 AA 含量约从 210 mg/100 g 降低至 170 mg/100 g，将配方乳粉的货架期延长至 2 年；沈雷等[88] 利用变性淀粉和酪蛋白包埋 AA 制备微胶囊，产品经 62 ℃ 贮藏 45 d 后，POV 仅为未包埋油脂的 1/10，将其添加于婴儿配方奶粉中，经充氮包装贮藏 1 年，AA 保留率仍可达到 93.01%，证明微胶囊是包埋 AA 的有效方法，微胶囊化的 AA 在配方奶粉中有较好的应用前景。虽然目前对于不饱和脂肪酸微胶囊化的应用大多局限于奶粉中，但这些研究结果表明，采用这种加工方式可以有效增强不饱和脂肪酸的稳定性、延长产品保质期、提升营养价值，为其在其他类型食品中的应用提供了参考。

4　结论与展望

UFA 由于对人体健康的促进作用，在食品、化妆品、医药等相关领域均得到了广泛应用。同时，利用微胶囊技术对其进行包埋，能有效缓解甚至避免其受到外界的光、氧等条件带来的氧化变质，提高其生物利用度。目前 UFAs 微胶囊化主要集中在对植物油或动物油的包埋，其主要挑战是如何在包埋和储存过程中减缓其氧化，提高其包埋率等，针对这些问题，需要通过对 UFA 及其产品的性质分析，选择合适壁材及微胶囊化方法，改进生产工艺，进而开发更为经济的工业化生产方式，为 UFAs 微胶囊化提供思路。此外，对于芯材在动物体内胃肠道中的释放情况及生物利用度也是重点关注的趋势。随着科技的发展，微胶囊技术会因新壁材、新设备、新技术等的开发而不断发展，对 UFA 的包埋也将日趋完善，必将为开发

高品质的 UFA 微胶囊功能食品的发展带来新的契机，从而促进食品工业的创新发展。

参考文献

[1] 魏越, 刘阳, 鲁明. 脂质成分在帕金森病发生中的研究进展[J]. 南京医科大学学报(自然科学版), 2022, 42(9): 1341−1348. [WEI Y, LIU Y, LU M. Progress of lipid components in the pathogenesis of Parkinson's disease[J]. Journal of Nanjing Medical University (Natural Sciences), 2022, 42(9): 1341−1348.]

[2] 王俊, 张明亮, 李力. 功能性 n-3 多不饱和脂肪酸的研究进展[J]. 福建轻纺, 2023, 404(1): 14−18. [WANG J, ZHANG M L, LI L. Research progress of functional n-3 polyunsaturated fatty acids[J]. The Light & Textile Industries of Fujian, 2023, 404(1): 14−18.]

[3] 吴洪号, 张慧, 贾佳, 等. 功能性多不饱和脂肪酸的生理功能及应用研究进展[J]. 中国食品添加剂, 2021, 32(8): 134−140. [WU H H, ZHANG H, JIA J, et al. Research progress of physiologic function and application of functional polyunsaturated fatty acids[J]. China Food Additives, 2021, 32(8): 134−140.]

[4] 王蒙蒙, 寇宇星, 周笙, 等. 不饱和脂肪酸室温氧化过程中自由基的变化[J]. 食品科学, 2021, 42(11): 56−62. [WANG M M, KOU Y X, ZHOU S, et al. Changes of free radicals during oxidation of unsaturated fatty acids at room temperature[J]. Food Science, 2021, 42(11): 56−62.]

[5] 胡明明, 张权, 吴思纷, 等. 西式快餐条件下煎炸油氧化稳定性及其不饱和脂肪酸氧化动力学研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(22): 15−22. [HU M M, ZHANG Q, WU S F, et al. Study on the oxidative stability of frying oil and kinetics of unsaturated fatty acids oxidation under the frying condition of western-style fast food restaurants[J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(22): 15−22.]

[6] 吕经秀, 张新笑, 李蛟龙, 等. 热处理对肉品脂质氧化的影响研究进展[J]. 肉类研究, 2022, 36(2): 53−58. [LÜ J X, ZHANG X X, LI J L, et al. Recent progress in research on the effect of heat treatment in lipid oxidation in meat and meat products[J]. Meat Research, 2022, 36(2): 53−58.]

[7] 肖小年, 刘璟, 易孜成, 等. 微胶囊化柚子籽油品质分析及货架期预测[J]. 南昌大学学报(理科版), 2019, 43(6): 537−542. [XIAO X N, LIU J, YI Z C, et al. Quality analysis and shelf life prediction on the microencapsulation of pomelo seed oil[J]. Journal of Nanchang University (Natural Science), 2019, 43(6): 537−542.]

[8] HASHIM N A, ABDUL MUDALIP S K, SULAIMAN S Z, et al. Nutritional values and microencapsulation techniques of fish oil from different sources: A mini review[J]. Materials Today:Proceedings, 2021, 42: 222−228.

[9] 黄宝玺, 王大为, 王金凤. 多不饱和脂肪酸的研究进展[J]. 农业工程技术(农产品加工业), 2009(8): 26−30. [HUANG B X, WANG D W, WANG J F. Research progress of polyunsaturated fatty acids[J]. Agriculture Engineering Technology (Agricultural Product Processing Industry), 2009(8): 26−30.]

[10] 曹野, 王伟琼, 陈晨, 等. ω-3 多不饱和脂肪酸的结构、代谢及与动脉粥样硬化的关系[J]. 中国动脉硬化杂志, 2018, 26(6): 633−643. [CAO Y, WANG W Q, CHEN C, et al. Structure and metabolism of ω-3 polyunsaturated fatty acid and its relationship with atherosclerosis[J]. Chinese Journal of Arteriosclerosis, 2018, 26(6): 633−643.]

[11] 陈则华, 胡慧芸, 陈鹰, 等. ω-3 多不饱和脂肪酸调节血脂及抗动脉粥样硬化作用机制研究进展[J]. 医药导报, 2018, 37(11): 1334−1338. [CHEN Z H, HU H Y, CHEN Y, et al. Research progress of omega-3 polyunsaturated fatty acids in regulating blood lipid and atherosclerosis[J]. Herald of Medicine, 2018, 37(11): 1334−1338.]

[12] 林杰. 不饱和脂肪酸的生理功能及其应用进展[J]. 广东化工, 2013, 40(6): 92−93. [LIN J. Unsaturated fatty physiologic function and its application progress[J]. Guangdong Chemical Industry, 2013, 40(6): 92−93.]

[13] 齐可民, 樊超男. n-3 多不饱和脂肪酸与儿童生长发育和健康[J]. 中华实用儿科临床杂志, 2016, 31(23): 1761−1765. [QI K M, FAN C N. Beneficial effects of n-3 polyunsaturated fatty acids on child development and health[J]. Chinese Journal of Applied Clinical Pediatrics, 2016, 31(23): 1761−1765.]

[14] CALVIELLO G, SERINI S, PICCIONI E. n-3 polyunsaturated fatty acids and the prevention of colorectal cancer: Molecular mechanisms involved[J]. Current Medicinal Chemistry, 2007, 14(29): 3059−3069.

[15] 李琪, 张娴. 多不饱和脂肪酸的生理功能概述[J]. 食品安全导刊, 2019, 243(18): 55. [LI Q, ZHANG X. Overview of physiological functions of polyunsaturated fatty acids[J]. China Food Safety Magazine, 2019, 243(18): 55.]

[16] 晁红娟, 雷占兰, 刘爱琴, 等. Omega-3 多不饱和脂肪酸性质、功能及主要应用[J]. 中国食品添加剂, 2019, 30(10): 122−130. [CHAO H J, LEI Z L, LIU A Q, et al. Properties, functions and main applications of omega-3 polyunsaturated fatty acid[J]. China Food Additives, 2019, 30(10): 122−130.]

[17] 杜乐. 油脂中 C_{18} 不饱和脂肪酸氧化产物的分析[D]. 天津: 天津科技大学, 2019. [DU L. Analysis of oxidation products of C_{18} unsaturated fatty acids in oils[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2019.]

[18] 郜海燕, 华颖, 陶菲, 等. 富含不饱和脂肪酸食品加工过程中的组分变化研究与展望[J]. 中国食品学报, 2011, 11(9): 134−143. [GAO H Y, HUA Y, TAO F, et al. Recent advances and future prospects in research on processed food: Preserving quality and nutritional value of food rich in unsaturated fatty acids[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2011, 11(9): 134−143.]

[19] 马晶晶, 孙冲, 张牧焓, 等. ω-6 多不饱和脂肪酸氧化产物 4-羟基壬烯醛的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(19): 57−64. [MAJ J, SUN C, ZHANG M H, et al. Research progress in the oxidation product 4-hydroxynonenal of omega-6 polyunsaturated fatty acids[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(19): 57−64.]

[20] 姚梦莹, 梁倩, 崔岩岩, 等. 不饱和脂肪酸经氧化反应形成反式脂肪酸机理研究进展[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(2): 170−178. [YAO M Y, LIANG Q, CUI Y Y, et al. Research progress on the formation mechanism of trans-fatty acids from unsaturated fatty acids using oxidation pathway[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2020, 35(2): 170−178.]

[21] 施斌. 主要食品抗氧化剂的光谱及抗氧化机理研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021. [SHI B. Study on the spectrum and antioxidant mechanism of main food antioxidants[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.]

[22] 邓金良, 刘玉兰, 王小磊, 等. 不同储存条件对浓香花生油风味及综合品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(17): 231−237. [DENG J L, LIU Y L, WANG X L, et al. Effects of different storage conditions on the flavor and overall quality of superfine fragrant peanut oil[J]. Food Science, 2020, 41(17): 231−237.]

[23] 郭立云, 顾肖敏, 王际平. 不同储存条件下汉麻籽油的理化性质研究[J]. 日用化学品科学, 2018, 41(12): 30−34. [GUO L Y, GU X M, WANG J P. Properties of hempseed oil under different

storage conditions[J]. Detergent and Cosmetics, 2018, 41(12): 30−34.]
[24] 何万红, 万五星. 多不饱和脂肪酸氧化酸败的解决方法[J]. 中国饲料, 2001(15): 29−30. [HE W H, WAN W X. Solution to oxidative rancidity of polyunsaturated fatty acids[J]. China Feed, 2001(15): 29−30.]
[25] RAMEZANZADEH ANDEVARI R, HASHEMI-NAJAFABADI S, BAGHERI F. Immunoisolation of stem cells by simultaneous encapsulation and PEGylation[J]. Progress in Biomaterials, 2018, 7(1): 55−60.
[26] 吴彩娥. 猕猴桃籽油 α-亚麻酸的富集及猕猴桃籽油微胶囊化技术研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2005. [WU C E. Study on α-linolenic acid enrichment & microencapsulation technology of Kiwifruits seed oil[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2005.]
[27] 姚翾, 陶宁萍, 王锡昌. 喷雾干燥法制取油脂微胶囊技术研究进展[J]. 现代食品科技, 2007(12): 85−89. [YAO X, TAO N P, WANG X C. Progress of lipid microencapsulation by spray-drying[J]. Modern Food Science and Technology, 2007(12): 85−89.]
[28] 李明. 红花籽油中亚油酸的分离及微胶囊化[D]. 无锡: 江南大学, 2006. [LI M. Separation and microencapsulation of linoleic acid in safflower oil[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2006.]
[29] 刘灵莉. 花生四烯酸微胶囊的制备工艺及其在婴幼儿乳粉中的应用[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2010. [LIU L L. Microencapsulation of arachidonic acid and the application in the infants of milk powder[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2010.]
[30] 杜明睿. 牡丹籽油微胶囊的制备及其生物学特性的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2020. [DU M R. Preparation and biological characteristics of peony seed oil microcapsules[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2020.]
[31] 陈彬, 王宗抗, 张敏, 等. 微胶囊壁材的研究进展[J]. 磷肥与复肥, 2020, 35(8): 50−52. [CHEN B, WANG Z K, ZAHNG M, et al. Research progress of microcapsule wall material[J]. Phosphate and Compound Fertilizer, 2020, 35(8): 50−52.]
[32] 田先卉. ω-3 多不饱和脂肪酸的稳态化研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2015. [TIAN X H. The research of the steady state of omega-3 polyunsaturated fatty acids[D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2015.]
[33] 张倩, 刘姝岩, 王中伟, 等. 多糖及其衍生物在食品微胶囊壁材中的应用[J]. 中国食品添加剂, 2019, 30(11): 132−137. [ZHANG Q, LIU S Y, WANG Z W, et al. Application of food microcapsule wall materials of polysaccharide and its derivatives[J]. China Food Additives, 2019, 30(11): 132−137.]
[34] 肖志刚, 邱天昊, 王鹏, 等. 喷雾干燥技术在油脂粉末中应用的研究进展[J]. 沈阳师范大学学报(自然科学版), 2022, 40(1): 54−58. [XIAO Z G, QIU T H, WANG P, et al. Research progress of spray drying technology in microencapsulated oil[J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science Edition), 2022, 40(1): 54−58.]
[35] 戚登斐. 核桃油微胶囊工艺优化及生理功能评价[D]. 西安: 陕西师范大学, 2020. [QI D F. Process optimization and physiological function evaluation of walnut oil microcapsule[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2020.]
[36] 张瑞. 果胶+明胶/乳清蛋白双层微胶囊包埋鼠李糖乳杆菌研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017. [ZHANG R. Study on *Lactobacillus rhamnosus* treated by pectin+gelatin/whey protein double layer microcapsules[D]. Haerbin: Northeast Agricultural University, 2017.]
[37] 胡志红, 严成, 何淋, 等. 以改性魔芋胶为主要壁材的核桃油微胶囊制备[J]. 食品工业科技, 2013, 34(15): 246−250. [HU Z H, YAN C, HE L, et al. Study on the preparation of walnut oil microcapsule used modified konjac gum as main wall material[J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(15): 246−250.]
[38] BAH M G, BILAL H M, WANG J. Fabrication and application of complex microcapsules: A review[J]. Soft Matter, 2019, 16(3): 570−590.
[39] 李亚萍. 山苍子精油微胶囊的制备及其在牛肉保鲜中的应用[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021. [LI Y P. Fabrication of *Litsea cubeba* essential oil microcapsules and its application in beef preservation[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2021.]
[40] 孙潇辉. 瓜蒌籽油提取及多不饱和脂肪酸的富集与微胶囊制备[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013. [SUN X H. The extraction of *Trichosanthes kirilowii* Maxim seed oil and the enrichment and encapsulation of polyunsaturated fatty acid[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2013.]
[41] 孙铭悦, 王欢, 江连洲. 基于喷雾干燥法制备微胶囊作为生物活性成分递送体系的研究进展[J]. 大豆科技, 2022(1): 37−45. [SUN M Y, WANG H, JIANG L Z. Research progress of microcapsule delivery system based on spray drying method to improve the availability of bioactive ingredients[J]. Soybean Science and Technology, 2022(1): 37−45.]
[42] MADENE A, JACQUOT M, SCHER J, et al. Flavour encapsulation and controlled release–a review[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2006, 41(1): 1−21.
[43] 李思敏, 彭茜, 戴志远, 等. 冷冻干燥法制备壳聚糖微胶囊[J]. 渔业现代化, 2019, 46(5): 82−88. [LI S M, PENG X, DAI Z Y, et al. Preparation of chitosan microcapsules by freeze-drying method[J]. Fishery Modernization, 2019, 46(5): 82−88.]
[44] 张维. 榛子油微胶囊的制备及其降血脂功能的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2021. [ZHANG W. Study on the preparation of hazelnut oil microcapsules and its hypolipidemic function[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2021.]
[45] 叶敏. 肉桂油微胶囊的制备及评价[D]. 南昌: 南昌大学, 2011. [YE M. Preparation and evaluation of cinnamon oil microcapsules[D]. Nanchang: Nanchang University, 2011.]
[46] 夏慧亭. 复凝聚法制备橄榄油微胶囊及其性质研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2016. [XIA H T. Preparation and characterization of olive oil microcapsule by complex coacervation[D]. Haerbin: Northeast Agricultural University, 2016.]
[47] 戴浩楠. 恩诺沙星明胶微囊单凝聚法制备工艺研究[D]. 太原: 山西农业大学, 2016. [DAI H N. Process research on preparation of enrofloxacin gelatin microcapsules by single coacervation[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2016.]
[48] 许琳琳, 郑文静, 刘磊, 等. 复凝聚法制备精油微胶囊的研究进展[J]. 中国调味品, 2018, 43(7): 165−169. [XU L L, ZHENG W J, LIU L, et al. Research progress on preparation of essential oil microcapsules by complex coacervation[J]. China Condiment, 2018, 43(7): 165−169.]
[49] 许春平, 刘远上, 贾学伟, 等. 喷雾冷凝法制备肉桂醛微胶囊的研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(22): 106−110. [XU C P, LIU Y S, JIA X W, et al. Preparation of microcapsules of cinnamaldehyde by spray condensation method[J]. Food Research and Development, 2016, 37(22): 106−110.]
[50] 殷欣, 程昊, 梁丽. 油脂的微胶囊包埋[J]. 科学观察, 2021,

16(6): 85−87. [YIN X, CHENG H, LIANG L. Microencapsulation of oil[J]. Science Focus, 2021, 16(6): 85−87.]
[51] 杨艳红, 李湘洲, 周军, 等. 山苍子油微胶囊的制备技术比较及其释放动力学[J]. 中国粮油学报, 2018, 33(7): 78−84. [YANG Y H, LI X Z, ZHOU J, et al. Comparative analysis of preparation methods and release kinetic of *Litsea cubeba* essential oil microcapsules[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2018, 33(7): 78−84.]
[52] 冼远芳, 王文廷, 于玮, 等. 凝聚法制备明胶类磁性微囊[J]. 中国组织工程研究, 2013, 17(29): 5357−5363. [XIAN Y F, WANG W T, YU W, et al. Preparation of gelatin magnetic microcapsules by coagulation method[J]. Chinese Journal of Tissue Engineering Research, 2013, 17(29): 5357−5363.]
[53] TIMILSENA Y P, ADHIKARI R, BARROW C J, et al. Microencapsulation of chia seed oil using chia seed protein isolate chia seed gum complex coacervates[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 91: 347−357.
[54] MARISA RIBEIRO A, ESTEVINHO B N, ROCHA F. Microencapsulation of polyphenols-the specific case of the microencapsulation of *Sambucus nigra* L. extracts-a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 105: 454−467.
[55] JIMENEZ M, GARCÍA H S, BERISTAIN C I. Spray-dried encapsulation of conjugated linoleic acid (CLA) with polymeric matrices[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2006, 86(14): 2431−2437.
[56] 庄丰辰, 胡锦华, 周鹏. 乳蛋白微胶囊包埋共轭亚油酸及其稳定性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2018, 9(16): 4381−4386. [ZHUANG F C, HU J H, ZHOU P. Microcapsulation of conjugated linoleic acid with milk proteins and its stability[J]. Journal of Food Safety and Quality, 2018, 9(16): 4381−4386.]
[57] 张中义, 张峻松, 张文叶, 等. 复合壁材共轭亚油酸微胶囊的制备及表征[J]. 中国粮油学报, 2012, 27(1): 70−74. [ZHANG Z Y, ZHANG J S, ZHANG W Y, et al. Preparation and characterization of conjugated linoleic acids encapsulated into compound encapsulant materials[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27(1): 70−74.]
[58] COSTA A M M, NUNES J C, LIMA B N B, et al. Effective stabilization of CLA by microencapsulation in pea protein[J]. Food Chemistry, 2015, 168: 157−166.
[59] 杨婷茹. 葡萄籽油生产工艺优化及其微胶囊化[D]. 西安: 陕西师范大学, 2019. [YANG R T. Optimization of grape seed oil production process and its microencapsulation[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2019.]
[60] 刘仁杰, 李哲, 毛思凝, 等. 乳酸菌微胶囊包埋技术与常用壁材的研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(9): 211−215. [LIU R J, LI Z, MAO S N, et al. Research progress of lactic acid bacteria microcapsule encapsulation technology and common wall materials[J]. Food & Machinery, 2019, 35(9): 211−215.]
[61] 娄文勇, 钟舒睿, 章智华, 等. 蛋白质基微胶囊壁材研究进展[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2019, 47(12): 116−125. [LOU W Y, ZHONG S R, ZHANG Z H, et al. Advance in proteins as microcapsule wall materials[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(12): 116−125.]
[62] 张学鹏. 红花籽油微胶囊的制备、性质及其应用研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2013. [ZHANG X P. Preparation, characterization and application of safflower oil microencapsulation[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2013.]
[63] PARK C W, KIM S J, PARK S J, et al. Inclusion complex of conjugated linoleic acid (CLA) with cyclodextrins[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(10): 2977−2983.
[64] 罗鹏, 周金玲, 陈国刚, 等. 基于混料设计试验优化包埋打瓜籽油中不饱和脂肪酸的复合壁材[J]. 粮食与油脂, 2015, 28(10): 25−27. [LUO P, ZHOU J L, CHEN G G, et al. Optimization of the complex shell material in embedding unsaturated fatty acids of seed-watermelon oil based on mixture design[J]. Cereals and Oils, 2015, 28(10): 25−27.]
[65] 王春玉, 张岩, 韩雨露, 等. 包合法制备橄榄油微胶囊的工艺研究[J]. 粮油食品科技, 2015, 23(1): 30−34. [WANG C Y, ZHANG Y, HAN Y L, et al. Preparation of olive oil microencapsulation by inclusion method[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2015, 23(1): 30−34.]
[66] 郭烨. 柚子籽油营养分析及其微胶囊制备[D]. 南昌: 南昌大学, 2012. [GUO Y. Nutrition analysis and microencapsulation of *Pomelo* seed oil[D]. Nanchang: Nanchang University, 2012.]
[67] 常情情. 直链糊精与共轭亚油酸复合物的制备、表征及性质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015. [CHANG Q Q. Preparation and properties of linear dextrin-conjugated linoleic acid complex [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015.]
[68] 孟宏昌. 多不饱和脂肪酸糖玻璃微胶囊化的研究[J]. 中国粮油学报, 2010, 25(5): 49−51. [MENG H C. Microencapsulating polyunsaturated fatty acid in saccharic glassy state[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2010, 25(5): 49−51.]
[69] 王悦. 微藻油微胶囊的制备及其性质研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020. [WANG Y. Study on the preparation and properties of algal oil microcapsules[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.]
[70] 何慧子. OSA 淀粉—黄原胶复配载体对 CLA 的保护及释放特性研究[D]. 无锡: 江南大学, 2016. [HE H Z. Research on properties of protection and release of CLA with OSA-modified starch and xanthan gum[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.]
[71] LEE J, SONG Y, LEE J Y, et al. Optimization and oxidative stability of the microencapsulated conjugated linoleic acid[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2009, 45(4): 348−351.
[72] 赵亚东. 母乳脂肪类似物的制备及其功能性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2011. [ZHAO Y D. Development of human milk fat substitutes and its function evaluation[D]. Haerbin: Northeast Agricultural University, 2011.]
[73] 马晓燕. 枸杞籽油的超临界萃取及其微胶囊化技术的研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2014. [MA X Y. Study on supercritical fluid extraction and microcapsulation technology of *Lycium barbarum* L. seed oil[D]. Jinan: Qilu University of Technology, 2014.]
[74] 常馨月. 奇亚籽油微胶囊的制备及其性质研究[D]. 重庆: 西南大学, 2021. [CHANG X Y. Preparation and properties of chia seed oil microcapsules[D]. Chongqing: Southwest University, 2021.]
[75] 葛双双. 余甘子核仁油不饱和脂肪酸富集及其油脂氧化稳定性研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2017. [GE S S. Enrichment of unsaturated fatty acid and oxidation stability of *Phyllanthus emblica* L. seed oil[D]. Beijing: China Academy of Forestry, 2017.]
[76] 黄英雄, 华聘聘. 用于油脂微胶囊化一些壁材[J]. 粮食与油脂, 2002(1): 26−29. [HUANG Y X, HUA P P. Research on some kinds of wall materials in the microencapsulation of oil[J]. Cereals & Oils, 2002(1): 26−29.]
[77] 康吟, 陶宁萍. 鱼油微胶囊化壁材的分类及应用[J]. 北京水产, 2006(4): 49−52. [KANG Y, TAO N P. Classification and ap-

plication of microencapsulated wall materials of fish oil[J]. Journal of Beijing Fisheries, 2006(4): 49−52.]
[78] ZHOU D, PAN Y, YE J, et al. Preparation of walnut oil microcapsules employing soybean protein isolate and maltodextrin with enhanced oxidation stability of walnut oil[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 83: 292−297.
[79] 韩婕妤, 罗文涛, 庞月红, 等. 奇亚籽油微胶囊储藏稳定性及释放性质研究[J]. 中国油脂, 2022, 47(12): 97−101. [HAN J Y, LUO W T, PANG Y H, et al. Storage stability and release properties of chia seed oil microcapsules[J]. China Oils and Fats, 2022, 47(12): 97−101.]
[80] 邓叶俊, 黄立新, 张彩虹, 等. 喷雾干燥法制备皱皮木瓜籽油微胶囊及其性能研究[J]. 林产化学与工业, 2018, 38(1): 33−38. [[DENG Y J, HUANG L X, ZHANG C H, et al. Study on the preparation and properties of microencapsulated *Chaenomeles sinensis* seed oil by spray drying[J]. Chemistry and Industry of Forest Products, 2018, 38(1): 33−38.]
[81] 潘梦婷. 超声波辅助水酶法提取猕猴桃籽中油脂及其微胶囊化的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016. [PAN M T. Ultrasonic assisted enzymatic water extract oil of kiwi seeds and its study of microcapsules[J]. Haerbin: Northeast Forestry University, 2016.]
[82] CHANDRAPALA J, OLIVER C, KENTISH S, et al. Ultrasonics in food processing[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2012, 19(5): 975−983.
[83] 曹侃, 李双双. 微胶囊技术在保健食品中的应用进展[J]. 食品安全导刊, 2019, 253(28): 58−61. [CAO K, LI S S. Application progress of microencapsulation technology in health food[J]. China Food Safety Magazine, 2019, 253(28): 58−61.]
[84] 陈晨. 蚕蛹油不饱和脂肪酸提取及微胶囊化研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2012. [CHEN C. Extraction of unsaturated fatty acids from *Silkworm pupa* oil and preparation of its microcapsules[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University, 2012.]
[85] 王亚. 紫苏油 α-亚麻酸的提取及微胶囊工艺研究[D]. 北京: 北京农学院, 2022. [WANG Y. Study on extraction and microencapsulation of α-linolenic acid from perilla seed oil[D]. Beijing: Beijing University of Agriculture, 2022.]
[86] 钱俊青, 范菁, 童君, 等. 多不饱和脂肪酸微胶囊改善小鼠学习记忆能力研究[J]. 浙江工业大学学报, 2018, 46(1): 114−118. [QIAN J Q, FAN J, TONG J, et al. Microencapsulation of polyunsaturated fatty acids improves learning and memory of mice[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2018, 46(1): 114−118.]
[87] 姚运辉. 花生四烯酸微囊的制备及应用研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2013. [YAO Y H. Preparation and application of arachidonic acid microcapsules[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2013.]
[88] 沈雷, 唐俊, 张云霞, 等. 花生四烯酸油微胶囊配方优化及稳定性研究[J]. 中国油脂, 2016, 41(4): 14−18. [SHEN L, TANG J, ZHANG Y X, et al. Formula optimization and stability of arachidonic acid oil microcapsule[J]. China Oils and Fats, 2016, 41(4): 14−18.]