杜明青, 郭傲然, 赵嘉琪, 等. 膳食脂质介导的类胡萝卜素消化吸收及递送体系研究进展 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(1): 488−498. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120355
DU Mingqing, GUO Aoran, ZHAO Jiaqi, et al. Progress on Dietary Lipid Mediated Carotenoid Digestion, Absorption and Delivery System[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(1): 488−498. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120355

· 专题综述 ·

膳食脂质介导的类胡萝卜素消化吸收及递送体系研究进展

杜明青[1,2], 郭傲然[1,2], 赵嘉琪[1,2], 刘回民[1,2,*], 刘景圣[1,2,*]
（1.吉林农业大学食品科学与工程学院, 吉林长春 130118;
2.小麦和玉米深加工国家工程研究中心, 吉林长春 130118）

摘　要: 类胡萝卜素具有抗氧化、抗癌和保护视力等多种功能，然而，水溶性差以及对光、热和 pH 不稳定限制了其在食品工业中的应用。膳食脂质一同摄入会增强类胡萝卜素的口服吸收，随着脂质摄入量的增加，类胡萝卜素生物可及性提高直至达到饱和；另外富含单不饱和脂肪酸和长链甘油三酯的脂质促进胡萝卜素类的消化吸收，而中链饱和脂肪酸含量较高的脂质对叶黄素类生物利用度的促进效果更好。此外，基于膳食脂质制备的负载类胡萝卜素的乳液、脂质体、胶束等递送体系进一步提高了类胡萝卜素的稳定性以及生物利用度，为类胡萝卜素应用于食品工业提供了较好的应用前景。本文综述了膳食脂质对类胡萝卜素消化吸收的影响及递送体系的最新进展，未来需投入更多的研究于类胡萝卜素的精准营养以及递送载体的开发，以进一步提高类胡萝卜素的生物利用度和功能活性。

关键词: 膳食脂质, 类胡萝卜素, 生物可及性, 生物利用度, 递送体系
中图分类号: TS201.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)01−0488−11
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024120355　　本文网刊:

Progress on Dietary Lipid Mediated Carotenoid Digestion, Absorption and Delivery System

DU Mingqing[1,2], GUO Aoran[1,2], ZHAO Jiaqi[1,2], LIU Huimin[1,2,*], LIU Jingsheng[1,2,*]
（1.College of Food Science and Engineering, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China;
2.National Engineering Research Center for Wheat and Corn Deep Processing, Changchun 130118, China）

Abstract: Carotenoids possess various functions such as antioxidant activity, anticancer effects, and vision protection, however, their poor water solubility and instability to light, heat, and varying pH significantly limit their applications in the food industry. Dietary lipid co-ingestion enhances carotenoid absorption, with bioaccessibility increasing proportionally to lipid intake until saturation occurs. Furthermore, dietary lipids rich in monounsaturated fatty acids and long-chain triglycerides generally favor the digestion and absorption of carotenes, while lipids rich in saturated fatty acids and medium-chain saturated generally favor the bioavailability of xanthophylls. Moreover, lipid-based delivery systems including emulsions, liposomes, and micelles - that encapsulate carotenoids significantly enhance their stability and bioavailability, offering promising applications for carotenoids in the food industry. This paper systematically reviews the latest research progress on the effects of dietary lipids on the digestion and absorption of carotenoids, as well as on delivery systems. Altogether, future studies should devote themselves to the precise nutrition of carotenoids and the development of delivery vectors, to further elevate the bioavailability and functional activity of carotenoids.

Key words: dietary lipids; carotenoids; bioaccessibility; bioavailability; delivery system

收稿日期: 2024−12−30
基金项目: “十四五”国家重点研发计划（2022YFF1100205）。
作者简介: 杜明青（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品生化工程与功能性食品, E-mail: dumingqing2022@163.com。
*** 通信作者:** 刘回民（1984−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 谷物化学与分子营养, E-mail: liuhuimin@jlau.edu.cn。
刘景圣（1964−）, 男, 博士, 教授, 研究方向: 粮食精深加工与功能性食品, E-mail: liujingsheng@jlau.edu.cn。

类胡萝卜素作为一种重要的天然脂溶性功能物质，广泛存在于藻类、真菌、细菌和植物中，是生物体呈现红色、橙色和黄色的主要原因[1]；类胡萝卜素是一类 C40 萜类化合物及其衍生物，由八个异戊二烯单元组成[2]；根据分子结构是否含有氧原子可以分为胡萝卜素类和叶黄素类。研究表明，类胡萝卜素具有抗癌、抗炎、抗肿瘤、保护视力以及提高免疫力等多种功能活性[3]。类胡萝卜素在人体内无法合成，必须从食物中获得，但是受到疏水性质的阻碍导致其生物利用度低[4]；其消化吸收必须形成混合胶束并在肠道脂质转运蛋白的介导下才能被肠道吸收[5−6]，吸收后类胡萝卜素被包裹形成乳糜微粒释放进入淋巴系统，最终进入血液循环，发挥功能。

在类胡萝卜素消化吸收的过程中，越来越多研究表明类胡萝卜素与膳食脂质共同摄入可增强其吸收利用[7−11]。膳食脂质在肠道消化阶段分解产生的游离脂肪酸（Fatty acid，FA）可以促进混合胶束的形成，刺激胆盐的分泌，溶解更多疏水性类胡萝卜素，并且促进肠道上皮细胞对于类胡萝卜素的摄取[12]。不同种类的膳食脂质对于类胡萝卜素生物利用度促进效果不同，明确其作用效果差异对于类胡萝卜素应用于功能性食品是十分必要的，但目前该类研究总结较少，基于此本文总结了膳食脂质对类胡萝卜素消化吸收的影响，并且综述了基于膳食脂质制备的类胡萝卜素递送体系及其应用研究，旨在为膳食脂质应用于高生物利用度类胡萝卜素功能性食品的设计和制造提供理论参考。

1　类胡萝卜素概述

1.1　分类及结构特性

类胡萝卜素是一种脂溶性色素，由 8 个 5 碳异戊二烯分子组成，在自然界中多以全反式构型存在[13−14]。研究表明，类胡萝卜素可以通过不同形式结构转变合成一种新的类胡萝卜素[15]。根据其化学结构是否含氧元素分为两类：胡萝卜素类和叶黄素类，胡萝卜素类包括 α-胡萝卜素、β-胡萝卜素和番茄红素等；而叶黄素类主要包括叶黄素、玉米黄素、β-隐黄质、岩藻黄质和虾青素。类胡萝卜素含有多个共轭双键的异戊二烯结构决定了其对于光照、温度、氧气和酸性环境较为敏感，在加工储存及代谢过程中极不稳定[16]，限制了其在食品工业中的应用。

1.2　功能特性

类胡萝卜素具有多种功能活性，例如视力保护、抗氧化、抗癌、神经保护等[17−22]，为消费者提供了众多健康益处。叶黄素和玉米黄素被吸收后集中在人眼视网膜黄斑区，能吸收特定波长的光，保护视网膜免受光化学损伤，同时延缓老年性黄斑变性的发展[17−18]；β-胡萝卜素、α-胡萝卜素和 β-隐黄质是维生素 A 前体物质，对增强免疫系统和认知功能至关重要[19−20]；另外，番茄红素和虾青素具有较强的抗氧化作用，可以预防心血管疾病和癌症等多种疾病[2,21]；岩藻黄质具有广泛的药理学特性，包括抗氧化、抗癌、抗炎以及神经保护等[22]。

1.3　类胡萝卜素的消化吸收

类胡萝卜素在体内的消化吸收过程如下：类胡萝卜素从食物基质释放进入胃肠道，经油脂包埋、胰脂肪酶水解后掺入混合胶束，由脂质转运蛋白介导吸收[23]。脂质转运蛋白主要包括：B 类 I 型清道夫受体（Scavenger receptor class B type I，SR-BI），是第一种被报道参与类胡萝卜素吸收的脂质转运蛋白，广泛存在于各种器官与组织中，主要介导胆固醇和胆固醇酯由高密度脂蛋白向细胞膜的转运[24]；白细胞分化抗原 36（Cluster of differentiation 36，CD36）是一种参与类胡萝卜素吸收的蛋白酶，主要在上皮细胞、十二指肠以及空肠中表达，以及尼曼-匹克 C1 型蛋白 1（Niemann-Pick C1-like 1，NPC1L1），是一种广泛分布于肝脏和肠细胞质膜的蛋白质[25]。吸收后 β-胡萝卜素、α-胡萝卜素和 β-隐黄质在细胞内 β-胡萝卜素-15,15’-加氧酶（β-carotene-15,15’-monooxygenase 1，BCO1）的作用下分解为视黄醇[26]，而叶黄素、玉米黄素以及番茄红素等则在线粒体 β,β-胡萝卜素-9’,10’-加氧酶 2（β,β-carotene-9’,10’-oxygenase 2，BCO2）的作用下进一步被分解[27]，接着被包裹形成乳糜微粒通过胞吐作用或通过 ATP 结合盒转运体 A1（ATP-binding cassette transporter A1，ABCA1）转运至淋巴系统[28]，最终进入门静脉循环，在体内发挥功能活性。示意图见图 1。

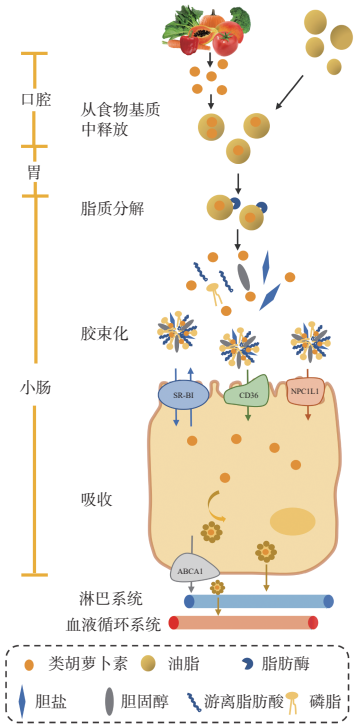


图 1　类胡萝卜素消化吸收机制图

Fig.1　Carotenoid digestion and absorption mechanism diagram

2　膳食脂质概述

膳食脂质作为人们日常生活中不可缺少的一种营

养物质，对于机体正常生理活动至关重要，其主要成分是甘油三酯、甘油二酯、单甘酯和游离脂肪酸以及少量磷脂和胆固醇[29]。目前，人们日常食用的膳食脂质主要分为植物性和动物性油脂；数据分析表明，大豆油、菜籽油、棕榈油和花生油是我国消费量最高的植物油脂，约占食用植物油消费的 90%[30]。膳食脂质脂肪酸饱和度和链长具有一定差异，植物性油脂不饱和脂肪酸含量较高，可以降低血液中胆固醇水平，对人体健康具有积极作用；而动物性油脂主要以饱和脂肪酸为主，过量摄入会增加动脉粥样硬化的风险[31−32]。另外，脂肪酸根据链长不同分为长链、中链和短链脂肪酸，例如大豆油、玉米油和橄榄油以长链脂肪酸为主，而棕榈油、菜籽油等主要是中链脂肪酸。

膳食脂质被摄入人体后，在小肠脂肪酶的作用下分解为甘油和脂肪酸，在脂溶性营养物质的消化吸收起载体作用，使其更好发挥功能活性。阐明膳食脂质与类胡萝卜素生物可及性和生物利用度之间的关联有助于建立提高其生物利用度和生物可及性的标准化策略，特别是根据不同膳食脂质的作用效果优化现有递送策略，以实现类胡萝卜素在功能性食品中的高效利用和工业化生产。

3 膳食脂质对类胡萝卜素消化吸收及健康作用的影响

类胡萝卜素作为一类亲脂性的功能活性成分，与膳食脂质共同摄入可以促进其胶束化并增强其生物可及性和生物利用度。生物可及性被定义为在胃肠道中从基质中释放出来的可用于肠道吸收的类胡萝卜素相对于总量的比例，而生物利用度是指已被吸收并到达体循环的类胡萝卜素的比例。越来越多研究表明，膳食油脂添加量以及种类对于类胡萝卜素消化过程有不同的影响（表 1）。

3.1 膳食脂质对类胡萝卜素消化吸收的影响

3.1.1 膳食脂质添加量 膳食脂质添加量对于类胡萝卜素的生物可及性和生物利用度有不同影响。Cristina 等[33] 研究了脂质添加量对于木瓜饮料中类胡萝卜素生物可及性的影响，当添加量为 3% 时，大豆油组与乳脂组的类胡萝卜素生物可及性分别增加了 2.3 倍和 1.6 倍。Mashurabad 等[34] 在不同食物基质中添加 0%~10% 橄榄油评估油脂添加量对类胡萝卜素胶束化率的影响，结果表明，不同添加量均提高了类胡萝卜素生物可及性，且胶束化剂量依赖性地从 0% 增加到 2.5% 的膳食脂肪。含有 0、0.2、0.6、1.0 g 脂质的赋形剂乳液，总类胡萝卜素的生物可及性分别为 3.1%、7.5%、14.4% 和 19.2%，并且血液中的叶黄素浓度随赋形剂乳液中脂质添加量增加而显著增加[35]。同样，Nemli 等[36] 研究发现乳液中橄榄油添加量为 20% 时类胡萝卜素的生物可及性达到最高。综上所述，在一定范围内，类胡萝卜素生物可及性和生物利用度随脂质添加量增加而增加，直至饱和水平。

3.1.2 脂肪酸种类

3.1.2.1 脂肪酸种类对类胡萝卜素生物可及性的影响 脂肪酸种类的差异会导致类胡萝卜素在消化系统中的溶解性、稳定性及转运效率发生变化，进而对其生物可及性产生不同影响，富含长链和单不饱和脂肪酸的膳食脂质通常有利于胡萝卜素类的胶束化，而中链饱和脂肪酸对于叶黄素类胶束化具有更好的促进效果。

利用体外消化模型研究不同油相制备的乳液对 β-胡萝卜素生物可及性的影响，结果表明，富含单不饱和脂肪酸的橄榄油将 β-胡萝卜素生物可及性提高至 62.97%[39]；Yuan 等[40] 通过制备赋形剂乳液来提高菠菜中类胡萝卜素的生物可及性，同样证实了单不饱和脂肪酸含量高的脂质对 β-胡萝卜素的生物可及性促进效果最好，并且验证了富含长链脂肪酸的膳食脂质具有更高的胡萝卜素生物可及性。此外，González 等[43] 研究了橄榄油、葵花籽油和椰子油对番茄红素生物可及性的促进效果，结果显示，无论是番茄块还是番茄果泥，橄榄油试验组的生物可及性均高于其余组，这表明单不饱和脂肪酸可以溶解更多由食物基质释放出的番茄红素。在一项研究中，Yao 等[46] 考察了不同比例中链甘油三酯（Medium chain triglycerides, MCT）和长链甘油三酯（Long chain transporters, LCT）对 β-胡萝卜素生物可及性的影响，随着 LCT 比例的降低，β-胡萝卜素的生物可及性呈现降低的趋势，但叶黄素则呈现出升高的趋势。相反，在菠菜基质中添加不同饱和度的膳食脂质，经体外消化后，黄油与棕榈油试验组的叶黄素和玉米黄素生物可及性高于橄榄油和鱼油约 20%~30%[44]；Nagao 等[51] 发现所有测试的不饱和长链脂肪酸都提高了 β-胡萝卜素的生物可及性，并且亚油酸和亚麻酸与油酸（Oleic acid, OA）相比生物可及性显著降低，证明更高饱和度的脂肪酸对于叶黄素生物可及性促进效果更好；Yuan 等[40] 在上述文章中同样证明了富含中链饱和脂肪酸的脂质（MCT、椰子油）能更好地促进叶黄素的胶束化。

富含中链饱和脂肪酸的膳食脂质初始消化速率快，短链脂肪酸从油滴表面快速释放，可以形成更小的混合胶束尺寸，对于叶黄素等亲脂性低的类胡萝卜素生物可及性促进效果较好；而亲脂性高的胡萝卜素类需聚集在脂滴内，长链单不饱和脂肪酸可以形成强大的疏水核心，进而溶解更多的胡萝卜素。膳食油脂中脂肪酸种类复杂多样，为了更精准的调控脂质对类胡萝卜素消化吸收的影响，未来可对单一脂肪酸以及脂肪酸复配作进一步研究。

3.1.2.2 脂肪酸种类对类胡萝卜素生物利用度的影响 类胡萝卜素被人体吸收利用是一个复杂的过程，涉及胃肠道消化、吸收、代谢、分布和生物活性。与生物可及性相似的是，富含中链饱和脂肪酸的脂质可以更好地促进叶黄素类的吸收利用，而长链单不饱和

表 1　膳食脂质对类胡萝卜素生物可及性和生物利用度的影响

Table 1　Effects of dietary lipids on the bioaccessibility and bioavailability of carotenoids

类胡萝卜素	膳食油脂	食物基质	添加量	主要发现	参考文献
β-隐黄质，番茄红素，*β*-胡萝卜素	大豆油，乳脂	木瓜饮料	0%~3%(w/w)	大豆油添加量从0%增加至3%时，总类胡萝卜素生物可及性从7.5%增加到17.3%，增加了2.3倍	[33]
叶黄素，*β*-胡萝卜素，番茄红素，*α*-胡萝卜素	橄榄油	菠菜，胡萝卜，木瓜，鼓槌叶	0%~10%(w/w)	添加橄榄油(0%~10%)可增加菠菜(22%~62%)和鼓槌叶(27%~59%)中叶黄素的胶束化；胡萝卜(4.8%~26.2%)、菠菜(7.2%~32%)、鼓槌叶(5.2%~29%)和木瓜(8.2%~48%)中*β*-胡萝卜素的胶束化；胡萝卜的*α*-胡萝卜素(4.6%~28%)和木瓜的番茄红素(3.4%~19.2%)的胶束化	[34]
叶黄素，*β*-胡萝卜素	MCT:LCT=1:1(w/w)	菠菜	0、0.2、0.6、1.0 g	添加0、0.2、0.6 g和1.0 g脂质的赋形剂乳液，总类胡萝卜素的生物可及性分别为3.1%、7.5%、14.4%和19.2%	[35]
番茄红素，叶黄素，*β*-胡萝卜素	橄榄油	番茄果渣	0%，5%，10%，20%(w/w)	20%乳液添加量类胡萝卜素生物可及性分别为：番茄红素(81.8%)、叶黄素(112.4%)和*β*-胡萝卜素(93.8%)的生物可及性	[36]
α-胡萝卜素，*β*-胡萝卜素	玉米油	胡萝卜	2%，10%(w/w)	添加玉米油或乳剂可提高类胡萝卜素的生物利用度(*α*-胡萝卜素的生物利用度可达14.08%)	[37]
β-胡萝卜素	玉米油	–	2.5%，5%，10%	玉米油添加量从2.5%增加到10%时，*β*-胡萝卜素的生物可及性增加，在10%达到最大值(93.2%)	[38]
β-胡萝卜素	大豆油，玉米油，橄榄油，MCT	–	10%(w/w)	油相为橄榄油制备的乳液显著提高*β*-胡萝卜素的生物可及性	[39]
叶黄素，*β*-胡萝卜素	MCT，椰子油，玉米油，橄榄油，鱼油	菠菜	4%(w/w)	叶黄素：MCT，椰子油>玉米油，橄榄油，鱼油 *β*-胡萝卜素：玉米油，橄榄油>MCT，椰子油，鱼油	[40]
玉米黄素二棕榈酸酯	大豆油，葵花籽油，亚麻籽油，橄榄油，玉米油	枸杞	5%(w/w)	添加橄榄油乳液中玉米黄素二棕榈酸酯生物可及性为25.67%	[41]
虾青素	亚麻籽油，橄榄油，玉米油	–	10%(w/w)	脂质类型为橄榄油时，虾青素生物可及性最高为68.4%，其次是亚麻籽油(53.2%)、玉米油(47.9%)	[42]
番茄红素	椰子油，葵花籽油，橄榄油	番茄	5%	脂质类型为橄榄油时，番茄红素和总类胡萝卜素生物可及性最高，其次是葵花籽油、椰子油	[43]
叶黄素，玉米黄素	黄油，棕榈油，橄榄油，鱼油	菠菜	–	黄油和棕榈油中叶黄素和玉米黄质的生物可及性大于橄榄油和鱼油(约20%~30%)	[44]
α-胡萝卜素，*β*-胡萝卜素，番茄红素	橄榄油，亚麻籽油，大豆油	胡萝卜，番茄	–	橄榄油乳液的消化速度更快，生物可及性更高	[45]
叶黄素，*β*-胡萝卜素	MCT，LCT	菠菜	–	随着MCT/LCT比例的增加，叶黄素的生物可及性增加，而*β*-胡萝卜素的生物可及性降低	[46]
叶黄素	牛酥油，橄榄油，亚麻籽油	–	–	添加牛酥油可提高叶黄素的口服生物利用度2.02、1.41和1.66倍	[47]
岩藻黄质	PA，MA，OA，SA	–	–	添加FAs进一步增强了这些作用，并且饱和脂肪酸和OA的加入进一步增强了岩藻黄质在体内的代谢	[48]
β-胡萝卜素	LCT，MCT			添加LCT和MCT可增加*β*-胡萝卜素细胞摄取量1.9倍和1.5倍	[49]
番茄红素	大豆油，棕榈油	木瓜	–	膳食脂质为棕榈油时，番茄红素生物利用度为0.442 μg/g高于大豆油(0.291 μg/g)	[50]
β-胡萝卜素和叶黄素	亚油酸，亚麻酸，油酸	菠菜	–	膳食脂质为更高饱和度的油酸时，叶黄素生物可及性最高	[51]

脂肪酸对于胡萝卜素类生物利用度促进效果更好[47−49]；例如，Bhat 等[47] 研究发现富含饱和脂肪酸的牛酥油试验组小鼠血浆中叶黄素水平显著高于其余组；Han 等[49] 研究了 LCT 和 MCT 作为载体油对细胞摄取 *β*-胡萝卜素的影响，结果表明，LCT 乳液的 *β*-胡萝卜素生物利用度较高。另有研究将 FA 引入牛血清蛋白(Bovine serum albumin，BSA)制备胶束封装岩藻黄质，并通过体内试验评估不同 FAs 对岩藻黄质口服吸收及组织积累的影响，结果表明，OA 对岩藻黄质的吸收促进作用最显著，其次是饱和脂肪酸[48]。

3.2　膳食脂质对类胡萝卜素健康作用的影响

类胡萝卜素作为一种强抗氧化剂在生物体中起重要作用，膳食脂质的介导进一步增强了类胡萝卜素对人体的健康作用。研究表明，FA-BSA 系统不仅可以增强岩藻黄质及其代谢物的积累，还可以增强体内抗氧化活性，岩藻黄质在饱和脂肪酸和 OA 递送系统中的抗氧化能力显著高于亚油酸和二十二碳六烯酸[48]。Padmanabha 等[52−53] 指出叶黄素与脂肪酸通过调节钙依赖性蛋白酶，恢复了白内障晶状体伴侣功能的丧失，并且含有二十碳五烯酸和二十二碳六烯酸的胶束表现出显著改善的效果；类似的，Murillo 等[54] 利用纳米乳液显著提高了叶黄素的生物利用度，并且通过减少氧化、脂质积累和白细胞介素-1*β* 的表达而具有保护肝脏的作用，可防止胆固醇诱导的损伤。

不同种类的膳食脂质促进类胡萝卜素的消化吸收，进而增强功能活性，但目前对于两者微观作用机制的研究较少，在后续研究中可以采用分子动力学模拟、光谱和色谱等方法，探讨其分子层面的机制以及类胡萝卜素之间的竞争关系。另外，类胡萝卜素经消化吸收后在肠上皮细胞进行代谢，研究表明，肠道中主要表达的两种类胡萝卜素裂解酶 BCO1 和 BCO2 的功能缺失会导致动物肝脏和脂肪组织中积累大量类胡萝卜素。BCO1 是一个单体、可溶性的胞质酶，

可与细胞质中生物膜、脂滴和蛋白质相互作用, 从而获取底物产生维生素 A; 而 BCO2 位于线粒体内膜上, 依赖信号肽定位于线粒体内膜, 功能缺失会导致肝脏线粒体内膜上胡萝卜醇积累[55]。但目前关于膳食脂质对类胡萝卜素裂解酶的影响研究较少, 未来可以通过探究其对裂解酶活性的影响来进一步提高类胡萝卜素功能活性, 为指导功能性食品的开发提供一定理论依据。

4 基于膳食脂质制备的载体增强类胡萝卜素的吸收利用

目前脂质对于类胡萝卜素消化吸收的重要性已被证实, 脂质作为类胡萝卜素掺入混合胶束的载体能够有效提高其生物可及性, 因此, 科研人员开发了多种以脂质为原料的递送载体, 旨在提高类胡萝卜素生物可及性、解决类胡萝卜素在功能性食品领域应用限制的问题, 其中包括乳液、脂质体、固体脂质纳米颗粒(Solid lipid nanoparticles, SLNs)和纳米结构脂质载体(Nanostructured lipid carriers, NLCs)等。表 2 列举了不同递送体系对类胡萝卜素生物可及性以及生物利用度的影响, 不同递送系统示意图见图 2。

4.1 基于脂质的类胡萝卜素递送体系

4.1.1 乳液 近年来, 研究人员开发了多种乳液用于递送类胡萝卜素; 基于乳液的递送体系通常是将类胡萝卜素溶解在油相中, 在外力及乳化剂作用下将其与水相混合所得[56−57]。赋形剂乳液是指利用适当的表面活性剂或外部条件, 将一相以纳米级液滴的形式高度分散于不相溶的另一相中的多相胶体分散体系[58]。研究表明, 在蔬菜沙拉中添加赋形剂乳液, 可以提高叶黄素、α-胡萝卜素、β-胡萝卜素以及番茄红素的生物利用度, 并且缩短血浆峰值时间 1~2 h[59]。Li 等[60] 利用橄榄油制备的赋形剂乳液显著提高了生、熟番茄中类胡萝卜素的生物可及性。纳米乳液是指粒径在 50~200 nm 的乳液, 其具有粒径均一、稳定性强和易通过细胞膜等优势, 被广泛应用于食品领域[61]。以 MCT 为油相制备负载叶黄素的纳米乳液显著提高了叶黄素的血浆浓度和生物利用度[54]。Toragall 等[62] 制备的纳米乳液同样增加了叶黄素体内生物利用度。还有研究发现, 使用不同植物油制备的纳米乳液对番茄红素生物可及性具有不同影响, 其中, 亚麻油纳米乳液对番茄红素的生物可及性提高程度最大[63]。Pickering 乳液因其利用固体颗粒代替传

表 2 基于膳食脂质制备的递送体系对类胡萝卜素口服吸收的影响

Table 2 Effect of delivery system based on dietary lipid preparation on oral absorption of carotenoids

类型		类胡萝卜素	膳食脂质	主要发现	参考文献
乳液	Pickering乳液	虾青素	玉米油	高内相Pickering乳液虾青素生物可及性达到51.17%, 显著高于对照组(29.83%±0.32%)	[69]
		β-胡萝卜素	玉米油	β-胡萝卜生物可及性随乳清分离蛋白浓度增加而显著提高	[70]
		β-胡萝卜素	MCT, 玉米油	MCT油乳剂通常比玉米油乳剂更稳定	[65]
		β-胡萝卜素	大豆油	水包油凝胶Pickering乳液显著提高了包封β-胡萝卜素的化学稳定性和生物可及性	[66]
		叶黄素	玉米油	Pickering乳液中叶黄素的保留率显著高于仅用玉米油的保留率	[67]
	赋形剂乳液	叶黄素, α-胡萝卜素, β-胡萝卜素, 番茄红素	菜籽油	菜籽油乳液血浆中叶黄素、α-胡萝卜素、β-胡萝卜素和番茄红素水平高于对照组	[59]
		总类胡萝卜素	橄榄油	橄榄油赋形剂乳液显著增加了类胡萝卜素的生物可及性(15%~51%)与对照组(10%)相比	[60]
	纳米乳液	叶黄素	MCT	纳米乳液组血浆中叶黄素浓度是对照组的2倍, 肝脏叶黄素浓度是对照组的1.6倍	[54]
		叶黄素	油酸, 亚油酸	叶黄素纳米乳液的体内生物利用度(112.6 ng/mL)远高于未包封叶黄素(48.6 ng/mL)和混合胶束(68.5 ng/mL)	[62]
		番茄红素	芝麻油, 亚麻油, 核桃油	油相为亚麻油时番茄红素的生物可及性最高为25%	[63]
	多层乳液	总类胡萝卜素	MCT	多层乳液中类胡萝卜素的生物可及性最高为11.3%	[72]
脂质体		虾青素	大豆磷脂, 胆固醇	脂质体中的虾青素的生物可及性(39.61%±1.13%)显著高于对照组(6.54%±1.42%)	[76]
		叶黄素, β-胡萝卜素, 番茄红素	蛋黄磷脂	脂质体包封类胡萝卜素生物可利用度最高, 叶黄素含量最高, 其次是β-胡萝卜素、番茄红素	[74]
胶束		岩藻黄质	棕榈酸, 肉豆蔻酸, 油酸, 硬脂酸, 亚油酸, 二十二碳六烯酸	脂肪酸加入后血清岩藻黄质浓度分别增加到111.61、137.97、128.75、182.35、88.32和106.77 pmol/mL, 并且在肝组织中也观察到类似的趋势	[48]
		虾青素	单硬脂酸甘油酯	虾青素生物利用度增加了4倍, 并且可以靶向肝脏, 发挥其抗氧化作用	[78]
固体脂质纳米颗粒和纳米结构脂质载体		β-胡萝卜素	植物油	β-胡萝卜素的生物可及性为92%	[81]
		β-胡萝卜素	氢化棕榈油	单不饱和长链脂肪酸(如油酸)和长链单酰基甘油有助于提高β-胡萝卜素的生物可及性	[82]
		叶黄素	亚麻籽油, 甘油二十二烷酸酯	鼠李糖稳定的NLCs具有相对较高的生物可及性(23.01%)	[83]

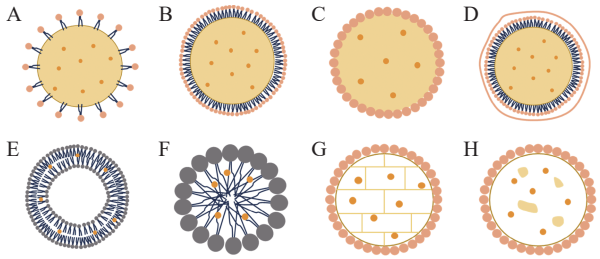


图 2　基于脂质制备的不同类型类胡萝卜素递送系统示意图

Fig.2　Schematic diagram of different types of carotenoid delivery systems based on lipid preparation

注：A：赋形剂乳液；B：纳米乳液；C：Pickering 乳液；D：多层乳液；E：脂质体；F：胶束；G：固体脂质颗粒；H：纳米结构脂质载体。

统表面活性剂和高稳定性的优点而受到广泛关注[64]，具有作为疏水性生物活性物质的封装和输送系统的潜力[65−68]。Zhang 等[69] 制备的高含油量的 Pickering 乳液能有效保护虾青素在胃肠环境下免受化学降解，且生物可及性显著提高至 51.17%；Yi 等[70] 以玉米油为油相制备的 Pickering 乳液显著提高了 β-胡萝卜素的生物可及性。多层乳液具有较厚的界面层，通常是由油、水和乳化剂均质形成乳液，然后加入含相反电荷的溶液通过静电沉积的方法制备而成的[71]。Zhang 等[72] 发现多层乳液显著提高了枸杞类胡萝卜素的生物可及性，在以 MCT 为油相的乳液中，类胡萝卜素生物可及性最高为 11.3%。综上所述，膳食脂质对于类胡萝卜素的消化吸收具有促进作用，基于膳食脂质制备的乳液递送系统可以更好地保护类胡萝卜素免受外界环境损伤，提高生物利用度。

不同类型乳液是亲脂性类胡萝卜素的有效递送系统，但在递送过程中仍存在一定缺点（表 3）。在稳定性方面，纳米乳液存在热力学和动力学不稳定的问题；同时，多层乳液在制备过程中易出现液滴聚集现象。此外，Pickering 乳液和赋形剂乳液因其原料与食物基质选择限制，在递送类胡萝卜素时可能存在生物相容性差的缺点。因此，未来可进一步研究提高乳液的稳定性和开发类胡萝卜素促健康作用的潜力。

4.1.2　脂质体　脂质体是由两亲性的磷脂分子分散在水相中形成的双层封闭的囊泡结构，与乳液递送系统相比，具有生物相容性高、低毒性和缓释性等特点；此外，还可以增加生物活性成分的溶出度[73]，在递送功能活性物质方面有着越来越广泛的应用[74−75]。脂质体的制备因其特殊结构多采用磷脂和胆固醇溶解功能活性物质，Pan 等[76] 将虾青素包封在脂质体中，显著提高了虾青素的生物可及性（39.61%）；Pen-ersen 等[77] 采用薄膜蒸发-超声法制备负载类胡萝卜素的脂质体，显著提高了类胡萝卜素生物可及性，并且不同类胡萝卜素生物可及性与插入脂质双层膜的能力和递送系统的性质显著相关。

脂质体的制备成本高，生产工艺复杂，通常采用大豆卵磷脂或蛋黄卵磷脂作为表面活性剂，这限制了原料的选择。因此，未来的研究应发掘更多类型的表面活性剂，以便更好地用于功能活性成分递送。

4.1.3　胶束　基于脂质和生物大分子的递送系统，如乳液和脂质体，对类胡萝卜素表现出较高的生物利用度，但是这些递送系统通常需要使用表面活性剂和乳化装置，对于食品应用来说成本昂贵且不安全；近年来，由食源性生物大分子和两亲性小分子自组装的胶束因其具有表面活性剂使用量少或无需使用、能耗低、易于制备等优点而受到关注[77]。例如：Li 等[48] 采用 BSA 与 FA 制备的非共价连接胶束增强了岩藻黄质的吸收、积累和抗氧化作用；Su 等[78] 以羟丙基 β-环糊精和单硬脂酸甘油酯为原料自组装制备了负载虾青素的胶束，药代动力学结果显示，虾青素的生物利用度与对照组相比增加了 4 倍。胶束作为一种新型的类胡萝卜素递送体系，具有多种优点，但在提高类胡萝卜素生物利用度以及健康作用方面研究较少。

4.1.4　固体脂质纳米颗粒和纳米结构脂质载体　SLNs 和 NLCs 因其稳定性高并且具有高度灵活和可控的释放曲线被用于封装各种亲脂性生物活性物质，可以较好地防止胃肠道条件下生物活性物质发生降解[79−80]。有研究以植物油为油相制备的 SLNs 显示出对 β-胡萝卜素出色的保护能力，生物可及性为 92%[81]。Helena 等[82] 采用不同脂质制备 SLNs 研究脂质消化和 β-胡萝卜素生物可利用性之间的关系，结果表明，氢化棕榈油显示出更高的生物可及性。此外，Ueno 等[83] 研究表明 SLNs 显著改善了叶黄素的溶解度，从而提高了叶黄素的口服吸收，相对生物利用度为 3.7。SLNs 由于其内部存在的晶体结构，

表 3　不同类型乳液递送类胡萝卜素优缺点分析

Table 3　Analysis of the advantages and disadvantages of different types of emulsion delivery of carotenoids

名称	优点	缺点	参考文献
赋形剂乳液	赋形剂乳液常用于与蔬菜、水果一同摄入，研究表明，类胡萝卜素从全食物中食用而不是作为膳食补充剂食用时，它们的健康效果通常会更好	赋形剂乳液可能会提高富含类胡萝卜素食物中其他不利成分的生物利用度，从而对健康产生不利影响	[35,58]
纳米乳液	乳液液滴具有较小尺寸（50~200 nm），并且具有更好的抗重力分离和粒子聚集的稳定性，可以有效防止乳液分离并具有更高的类胡萝卜素生物可及性	纳米乳液热力学不稳定；较低动力学稳定性导致类胡萝卜素会随着储存期而分解	[61]
Pickering乳液	界面吸附过程为不可逆吸附过程；采用固体颗粒替代表面活性剂和生物聚合物，提供了更厚的界面屏障增加了乳液的稳定性，并允许在消化过程中有针对性地缓慢释放类胡萝卜素	对固体颗粒的选择和处理要求较高，可能具有生物不相容性，引起不良反应	[65,67]
多层乳液	通过静电沉积形成由蛋白质和生物聚合物组成的界面层，提高了乳液的稳定性，实现了活性成分的缓慢释放	采用层层吸附技术制备多层乳液过程中，易出现液滴聚集的现象	[71]

降低了类胡萝卜素的流动性和扩散效率，限制了促氧化剂和其他分子的渗透，从而减缓类胡萝卜素的释放和降解；但其高度堆积的固体基质将封装的类胡萝卜素排出到纳米颗粒表面，导致封装化合物不稳定，而 NLCs 结构中部分晶体有助于为容纳生物活性成分提供更多空间，从而减少排斥并提高负载能力，并控制类胡萝卜素的释放。Shu 等[84] 制备叶黄素-NLCs 以亚麻籽油和甘油二十二烷酸酯为油相，生物可及性最高可达 23.01%；Rohmah 等[85] 研究表明 NLCs 提高了 β-胡萝卜素生物可及性和抗氧化能力。

尽管上述递送体系实现了功能物质的包埋和递送，显著提高了类胡萝卜素生物利用度和功效，但是，乳液贮藏稳定性差，且对贮藏条件敏感；脂质体包封率低、不易大规模生产；SLNs 和 NLCs 原料组成复杂、存在安全风险。因此，在未来的研究中，应开发新型制备工艺、选用天然安全的原料，以提高载体包封率和安全性，促进载体的工业化生产。此外，考虑到脂质添加量和类型对类胡萝卜素生物可及性的影响，在制备负载叶黄素类递送载体时，脂质应主要选择中链饱和脂肪酸；而对于胡萝卜素类递送载体，则应以长链单不饱和脂肪酸为主。同时，还需考虑脂肪酸对类胡萝卜素相关脂质转运蛋白表达的影响。研究表明，脂肪的摄入被认为具有调节转运蛋白活性的潜力[86−87]。例如：Kuang 等[28] 证实肉豆蔻酸（Myristic acid, MA）、棕榈酸（Palmitic acid, PA）、硬脂酸（Stearic acid, SA）可以提高 SR-BI、ABCA1 和 CD36 蛋白表达水平，促进岩藻黄质的口服吸收；另外有研究表明 MCT 刺激 SR-BI mRNA 的表达，促进肠道对 β-胡萝卜素的吸收[86]；相似的，一些长链和中链脂肪酸可以促进小肠中 CD36 的表达，进而促进功能活性物质的吸收[87]。因此，未来的研究可以结合脂质对类胡萝卜素转运蛋白的影响，进一步优化载体构建策略，最大限度地发挥其功能活性。

4.2 类胡萝卜素递送体系在食品中的应用

4.2.1 作为食品添加剂提高食品质量 类胡萝卜素递送系统为其在水性食品或干燥食品中的应用奠定了基础。Haniff 等[88] 通过胡萝卜素油生产创新型蛋黄酱，具有良好的感官效果，并且产品的抗氧化活性与类胡萝卜素含量呈正相关；Pan 等[89] 将叶黄素乳液作为蔗糖替代物制备具有抗氧化活性软糖，当替代比为 60% 时，生物可及性达到最大值，并使得软糖的颜色稳定性、质构特性得到改善，感官评分增高；Saini 等[90] 将叶黄素提取物纳米乳剂应用于乳制品，显示出较好的抗菌和抗氧化作用，并且不会影响感官属性。Toniazzo 等[91] 生产负载 β-胡萝卜素的脂质体并掺入酸奶中，可以替代部分人造色素并增强功能特性；另外，有研究表明富含虾青素的双层乳液对奇异果油保质期和抗氧化作用有显著改善作用[92]。以上研究表明，类胡萝卜素的递送体系为改善食品品质和增进人类健康开发出更多的可能性。

4.2.2 3D 打印食品 食品 3D 打印技术作为一种在食品领域新兴的智能快速加工技术，其个性化定制、数字化加工的特性引领食品工业发展潮流[93]。对于 3D 食品打印技术，打印油墨的选择至关重要，而乳液凝胶具有的乳化特性以及独特三维结构和机械性能使其在食品 3D 打印领域有着广泛的应用前景。Zhong 等[94] 将负载岩藻黄质的乳液凝胶应用于 3D 打印可在低油相条件下取代传统奶油 50%；邓帅等[95] 运用双喷头 3D 打印技术，成功构建了 3D 打印叶黄素乳液凝胶体系，提高叶黄素生物可及性最高为 47.97%。Song 等[96] 利用 3D 打印技术为负载虾青素的高内相 Picking 乳液提供了个性化的形状，并且虾青素提供了较好的颜色和营养。越来越多研究将递送体系与 3D 打印技术相结合，为各种创新产品以及个性化健康食品的开发提供新策略，拓宽了食品加工方式。

5 结论与展望

类胡萝卜素消化吸收需要先整合至混合胶束中再被肠细胞吸收，膳食脂质摄入量和脂肪酸组成会影响类胡萝卜素的吸收效率，进而影响对人体的健康作用。类胡萝卜素的生物利用度随着膳食脂质摄入量的增加而不断提高，直到达到饱和。富含中链以及高饱和度脂肪酸的脂质通常有利于叶黄素类的消化吸收；相反，长链以及单不饱和脂肪酸更能促进胡萝卜素类生物利用度的提高。基于膳食脂质开发出的多种类胡萝卜素递送体系，如乳液、胶束、纳米结构脂质载体等，在一定程度上提高了类胡萝卜素的稳定性和生物利用度。

然而目前膳食脂质对类胡萝卜素消化吸收的影响机制以及递送载体如何更好地应用于食品中仍有许多问题需要解决，例如：脂质与类胡萝卜素体内相互作用机制，载体设计时脂质的选择以及递送体系对食品的营养学特性及体内安全评价等的影响；根据存在的问题，未来的研究应更侧重于以下几个方面：a.在分子层面上进一步分析相互作用机制以及类胡萝卜素相互竞争关系。b.充分考虑脂质对脂质转运蛋白、类胡萝卜素裂解酶活性等的影响，对载体构建策略进一步优化，实现类胡萝卜素更高效的利用。c.未来研究应进一步评估递送载体对人体的潜在毒性，制备安全、无毒、可广泛应用于食品的递送体系。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] RODRIGUEZ-CONCEPCION M, AVALOS J, BONET M L, et al. A global perspective on carotenoids: Metabolism, biotechnology, and benefits for nutrition and health[J]. Progress in Lipid Research, 2018, 70: 62−93.

[2] BUFKA J, VAŇKOVÁ L, SÝKORA J, et al. Exploring carotenoids: Metabolism, antioxidants, and impacts on human health[J]. Journal of Functional Foods, 2024, 118: 106284.

［3］ PANAHI B, HOSSEINZADEH GHARAJEH N, MOHAMMADZADEH JALALY H, et al. Harnessing systems biology approach for characterization of carotenoid biosynthesis pathways in microalgae[J]. Biochemistry and Biophysics Reports, 2024, 39: 101759.
［4］ LIU Y, ZHANG C, CUI B, et al. Carotenoid-enriched oil preparation and stability analysis during storage: Influence of oils' chain length and fatty acid saturation[J]. LWT, 2021, 151: 112163.
［5］ ZHANG Y, LI R, XU Z, et al. Recent advances in the effects of food microstructure and matrix components on the bioaccessibility of carotenoids[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 143: 104301.
［6］ REBOUL E. Proteins involved in fat-soluble vitamin and carotenoid transport across the intestinal cells: New insights from the past decade[J]. Progress in Lipid Research, 2023, 89: 101208.
［7］ GUO Z, LIU Y, LUO Y. Mechanisms of carotenoid intestinal absorption and the regulation of dietary lipids: Lipid transporter -mediated transintestinal epithelial pathways[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(7): 1791−1816.
［8］ LIU Y, LIU Y. Construction of lipid-biomacromolecular compounds for loading and delivery of carotenoids: Preparation methods, structural properties, and absorption-enhancing mechanisms[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2024, 64(6): 1653−1676.
［9］ MORAN N E, MOHN E S, HASON N, et al. Intrinsic and extrinsic factors impacting absorption, metabolism, and health effects of dietary carotenoids[J]. Advances in Nutrition, 2018, 9(4): 465−492.
［10］ KIM J E, GORDON S L, FERRUZZI M G, et al. Effects of egg consumption on carotenoid absorption from co-consumed, raw vegetables[J]. American Journal of Clinical Nutrition, 2015, 102(1): 75−83.
［11］ LEMMENS L, COLLE I, van BUGGENHOUT S, et al. Carotenoid bioaccessibility in fruit- and vegetable-based food products as affected by product (micro)structural characteristics and the presence of lipids: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2014, 38(2): 125−135.
［12］ FERNANDES A S, NASCIMENTO T C, PINHEIRO P N, et al. Bioaccessibility of microalgae-based carotenoids and their association with the lipid matrix[J]. Food Research International, 2021, 148: 110596.
［13］ 罗泽天, 齐玉, 马佳骏, 等. 类胡萝卜素生物合成研究进展[J]. 天津理工大学学报, 2025, 41(5): 127−132. ［LUO Zetian, QI Yu, MA Jiajun, et al. Progress of carotenoid biosynthesis research[J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2025, 41(5): 127−132.］
［14］ 杨成. 含氧类胡萝卜素异构体的制备纯化, 吸收代谢及对肠道功能的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2018. ［YANG Cheng. Xanthophyll isomers: Rapid preparation, purification, metabolic fate and their effects on the intestinal function[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2018.］
［15］ 于银凤, 刘青青, 刘晓春, 等. 植物类胡萝卜素的代谢调控及储存转运研究进展[J]. 亚热带植物科学, 2024, 53(1): 80−88. ［YU Y F, LIU Q Q, LIU X C, et al. Research advances in metabolic regulation, storage and transport of carotenoids in plants[J]. Subtropical Plant Science, 2024, 53(1): 80−88.］
［16］ 陈敏, 王锡昌. 包封类胡萝卜素运载体系研究进展[J]. 中国食品学报, 2024, 24(2): 442−453. ［CHEN M, WANG X C. Research progress of encapsulated carotenoid delivery systems[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(2): 442−453.］
［17］ LI X, HOLT R R, KEEN C L, et al. Potential roles of dietary zeaxanthin and lutein in macular health and function[J]. Nutrition Research Reviews, 2023, 81(6): 670−683.
［18］ 赵明姣. 不同加工方式对胡萝卜及类胡萝卜素缓解小鼠溃疡性结肠炎的影响[D]. 南昌: 南昌大学, 2023. ［ZHAO M J, Effects of different processed carrots and carotenoids on ulcerativecolitis in mice[D]. Nanchang: Nanchang University, 2023.］
［19］ CHEN Y, CAPUANO E, STIEGER M. The effects of carrot shape and oral processing behaviour on bolus properties and beta-carotene bioaccessibility of raw carrots[J]. Food Research International, 2024, 179: 114051.
［20］ QIANG S, ZHOU J, YANG T, et al. Structure, stability and *in vitro* digestion of a novel zein-based oil gel delivery system loaded *β*-carotene[J]. Journal of Food Engineering, 2024, 366: 111848.
［21］ FENG X, ZHU H, DAI H, et al. Modulating the stability and gastrointestinal tolerance of lycopene in low-oil gelatin emulsions by constructing cellulose network barrier[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 155: 110225.
［22］ KUMARASINGHE H S, GUNATHILAKA M. A systematic review of fucoxanthin as a promising bioactive compound in drug development[J]. Phytochemistry Letters, 2024, 61: 52−65.
［23］ KIRKHUS B, AFSETH N K, BORGE G I A, et al. Increased release of carotenoids and delayed *in vitro* lipid digestion of high pressure homogenized tomato and pepper emulsions[J]. Food Chemistry, 2019, 285: 282−289.
［24］ MARQUES P E, NYEGAARD S, COLLINS R F, et al. Multimerization and retention of the scavenger receptor SR-B1 in the plasma membrane[J]. Developmental Cell, 2019, 50(3): 283−295.e5.
［25］ 陈璇. 黄酮类化合物(槲皮素、木犀草素)与类胡萝卜素(番茄红素、叶黄素)协同抗氧化作用及分子机制[D]. 南昌: 南昌大学, 2022. ［CHEN Xuan. Synergistic antioxidant effects and mechanisms of flavonoids(quercetin, luteolin) and carotenoids(lycopene, lutein)[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022.］
［26］ PRAUD C, AL AHMADIEH S, VOLDOIRE E, et al. Beta-carotene preferentially regulates chicken myoblast proliferation withdrawal and differentiation commitment via BCO1 activity and retinoic acid production[J]. Experimental Cell Research, 2017, 358(2): 140−146.
［27］ THOMAS L D, RAMKUMAR S, GOLCZAK M, et al. Genetic deletion of Bco2 and Isx establishes a golden mouse model for carotenoid research[J]. Molecular Metabolism, 2023, 73: 101742.
［28］ KUANG H Y, PENG X, LIU Y, et al. The pro-absorptive effect of glycosylated zein-fatty acid complexes on fucoxanthin via the lipid transporter protein delivery pathway[J]. Food Chemistry, 2024, 446: 138892.
［29］ 刁小琴, 刘冠华, 陈晓东, 等. 膳食脂质肠道消化及吸收的研究进展[J]. 现代食品科技, 2023, 39(12): 53−61. ［DIAO X Q, LIU G H, CHEN X D, et al. Advancements in research on intestinal digestion behavior and absorption of dietary lipids[J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(12): 53−61.］
［30］ 赵艳飞, 王继永. 我国主要植物油料油脂供需现状、问题及发展对策[J]. 作物杂志, 2024(3): 8−12. ［ZHAO Yanfei, WANG Jiyong. Current situation, problems and development countermeasures of supply and demand of main plant oil in China[J]. Crops, 2024(3): 8−12.］
［31］ 叶展. 典型膳食油脂胃肠道消化吸收特性及其对肠道健康

的影响研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020. [YE Z. Studies on characteristics of typical dietary oil gastrointestinal digestion and absorption, and their influences on gut health[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.]

[32] 李睿智. 过量摄入不同膳食脂肪对脂肪酸体内分布及脂质稳态的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2021. [LI R Z, Effects of excessive different dietary fats intake on the distribution *in vivo* of fatty acids and lipid homeostasis [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.]

[33] CRISTINA Z C, LAURA A E, MARIANELA C M, et al. Effect of lipid addition on carotenoid bioaccessibility in a dairy-based *Papaya* (*Carica papaya*) beverage[J]. ACS Food Science & Technology, 2024, 4(3): 586−594.

[34] MASHURABAD P C, PALIKA R, JYRWA Y W, et al. Dietary fat composition, food matrix and relative polarity modulate the micellarization and intestinal uptake of carotenoids from vegetables and fruits[J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 54(2): 333−341.

[35] YAO K F, McCLEMENTS D J, YAN C, et al. *In vitro* and *in vivo* study of the enhancement of carotenoid bioavailability in vegetables using excipient nanoemulsions: Impact of lipid content[J]. Food Research International, 2021, 141: 110162.

[36] NEMLI E, CAPANOGLU E, McCLEMENTS D J, et al. Use of excipient emulsions for improving the bioaccessibility of antioxidants in tomato sauce[J]. Food Chemistry, 2023, 424: 136395.

[37] LIU Jianing, BI Jinfeng, LIU Xuan, et al. Effects of high pressure homogenization and addition of oil on the carotenoid bioaccessibility of carrot juice[J]. Food & Function, 2019, 10(1): 458−468.

[38] TAN Yunbing, ZHANG Zhiyun, ZHOU Hualu, et al. Factors impacting lipid digestion and *β*-carotene bioaccessibility assessed by standardized gastrointestinal model (INFOGEST): Oil droplet concentration[J]. Food & Function, 2020, 11(8): 7126−7137.

[39] HAN G, DUAN X, JIANG B, et al. Emulsifying properties, *in vitro* digestive characteristics, and *β*-carotene bioaccessibility of mandarin peel pectin emulsions prepared with different carrier oil phases[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242: 124961.

[40] YUAN X, LIU X, MCCLEMENTS D J, et al. Enhancement of phytochemical bioaccessibility from plant-based foods using excipient emulsions: Impact of lipid type on carotenoid solubilization from spinach[J]. Food & Function, 2018, 9(8): 4352−4365.

[41] KAN Xuhui, YAN Yamei, RAN Linwu, et al. Evaluation of bioaccessibility of zeaxanthin dipalmitate from the fruits of *Lycium barbarum* in oil-in-water emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105: 105781.

[42] LIU X J, ZHANG R J, McCLEMENTS D J, et al. Nanoemulsion-based delivery systems for nutraceuticals: Influence of long-chain triglyceride (LCT) type on *in vitro* digestion and astaxanthin bioaccessibility[J]. Food Biophysics, 2018, 13(4): 412−421.

[43] GONZÁLEZ-CASADO S, MARTÍN-BELLOSO O, ELEZ-MARTÍNEZ P, et al. *In vitro* bioaccessibility of colored carotenoids in tomato derivatives as affected by ripeness stage and the addition of different types of oil[J]. Journal of Food Science, 2018, 83(5): 1404−1411.

[44] GLEIZE B, TOURNIAIRE F, DEPEZAY L, et al. Effect of type of TAG fatty acids on lutein and zeaxanthin bioavailability[J]. The British Journal of Nutrition, 2013, 110(1): 1−10.

[45] VERKEMPINCK S H E, SALVIA-TRUJILLO L, MOENS L G, et al. Kinetic approach to study the relation between *in vitro* lipid digestion and carotenoid bioaccessibility in emulsions with different oil unsaturation degree[J]. Journal of Functional Foods, 2018, 41: 135−147.

[46] YAO Kangfei, McCLEMENTS D J, XIANG Jiaxin, et al. Improvement of carotenoid bioaccessibility from spinach by co-ingesting with excipient nanoemulsions: Impact of the oil phase composition[J]. Food & Function, 2019, 10(9): 5302−5311.

[47] BHAT I, MADHURA R J, BADANTHADKA M, et al. Cow ghee as an efficient carrier to improve oral bioavailability of lutein [J]. Food Chemistry, 2022, 389: 133046.

[48] LI Donghui, LIU Yunjun, LIU Yixiang, et al. Encapsulation of fucoxanthin in fatty acid-bovine serum albumin micelles to improve the stability, bioavailability, and bioefficacy[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2022, 220: 112951.

[49] HAN Jiarun, GU Luping, ZHANG Ruojie, et al. Bioaccessibility and cellular uptake of *β*-carotene in emulsion-based delivery systems using scallop (*Patinopecten yessoensis*) gonad protein isolates: Effects of carrier oil[J]. Food & Function, 2019, 10(1): 49−60.

[50] SOTO M, SERVENT A, POUCHERET P, et al. Carotenoid absorption in rats fed with vacuum-fried papaya chips depends on processed food microstructure associated with saturated and unsaturated oils[J]. Food Research International, 2021, 142: 110223.

[51] NAGAO A, KOTAKE-NARA E, HASE M. Effects of fats and oils on the bioaccessibility of carotenoids and vitamin E in vegetables[J]. Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry, 2013, 77(5): 1055−1060.

[52] PADMANABHA S, VALLIKANNAN B. Fatty acids influence the efficacy of lutein in the modulation of *α*-crystallin chaperone function: Evidence from selenite induced cataract rat model[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2020, 529 (2): 425−431.

[53] PADMANABHA S, VALLIKANNAN B. Fatty acids modulate the efficacy of lutein in cataract prevention: Assessment of oxidative and inflammatory parameters in rats[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2018, 500(2): 435−442.

[54] MURILLO A G, AGUILAR D, NORRIS G H, et al. Compared with powdered lutein, a lutein nanoemulsion increases plasma and liver lutein, protects against hepatic steatosis, and affects lipoprotein metabolism in guinea pigs 1 2 3[J]. The Journal of Nutrition, 2016, 146(10): 1961−1969.

[55] 张丽莉, 王国栋, 黄世玉, 等. 水产动物类胡萝卜素的吸收、代谢和沉积机制研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2023, 38(6): 1072−1082. [ZHANG Lili, WANG Guodong, HUANG Shiyu, et al. Research progress on the mechanism of carotenoid absorption, metabolism and deposition in animals in aquature: A review[J]. Journal of Dalian Fisheries University, 2023, 38(6): 1072−1082.]

[56] SALVIA-TRUJILLO L, VERKEMPINCK S H E, SUN L, et al. Lipid digestion, micelle formation and carotenoid bioaccessibility kinetics: Influence of emulsion droplet size[J]. Food Chemistry, 2017, 229: 653−662.

[57] 孟豪杰, 潘丽, 刘彦君, 等. 虾青素的运载体系研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2023, 44(5): 125−132. [MENG Haojie, PAN Li, LIU Yanjun, et al. Recent research advances in the delivery systems for astaxanthin[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2023, 44(5): 125−132.]

[58] 袁曦. 不同类型赋形剂乳液对菠菜中类胡萝卜素生物可给性的影响[D]. 广州: 华南农业大学, 2018. [YUAN X, Effect of the structure and composition of excipient emulsions on the bioac-

cessibility of carotenoids in spinach[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2018.]
[59] LUO Haiyan, LI Zhengze, STRAIGHT C R, et al. Black pepper and vegetable oil-based emulsion synergistically enhance carotenoid bioavailability of raw vegetables in humans[J]. Food Chemistry, 2022, 373: 131277.
[60] LI Qian, LI Ti, LIU Chengmei, et al. Enhancement of carotenoid bioaccessibility from tomatoes using excipient emulsions: Influence of particle size[J]. Food Biophysics, 2017, 12(2): 172−185.
[61] 赵新杰. 岩藻黄素纳米乳液的制备及体外消化特性研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2023. [ZHAO X J, Preparation and *in vitro* digestion offucoxanthin nanoemulsion[D]. Jinan: Qilu University of Technolog, 2023.]
[62] TORAGALL V, SRIRANGAM P, JAYAPALA N, et al. Lutein encapsulated oleic - linoleic acid nanoemulsion boosts oral bioavailability of the eye protective carotenoid lutein in rat model [J]. Materials Today Communications, 2021, 28: 102522.
[63] ZHAO Caicai, WEI Liping, YIN Bobo, et al. Encapsulation of lycopene within oil-in-water nanoemulsions using lactoferrin: Impact of carrier oils on physicochemical stability and bioaccessibility[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 153: 912−920.
[64] 刘子琪, 李依蒙, 王璐, 等. 岩藻多糖对玉米醇溶蛋白稳定 Pickering 乳液制备及表征的影响[J]. 中国油脂, 2024(6): 71−79. [LIU Z Q, LI Y M, WANG L, et al. Effect of fucoidan polysaccharide on preparation and characterization of zein stabilized Pickering emulsion[J]. China Oils and Fats, 2024(6): 71−79.]
[65] TAN Huan, HAN Liyang, YANG Chen. Effect of oil type and β-carotene incorporation on the properties of gelatin nanoparticle-stabilized Pickering emulsions[J]. LWT, 2021, 141: 110903.
[66] QI Wenhui, ZHANG Zhisheng, WU Tao. Encapsulation of β-carotene in oleogel-in-water Pickering emulsion with improved stability and bioaccessibility[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 164: 1432−1442.
[67] NI Jialu, WANG Kuiyou, YU Deyang, et al. Pickering emulsions stabilized by *Chlorella pyrenoidosa* protein–chitosan complex for lutein encapsulation[J]. Food & Function, 2023, 14(6): 2807−2821.
[68] YAN C, McCLEMENTS D J, ZOU L Q, et al. A stable high internal phase emulsion fabricated with OSA-modified starch: An improvement in β-carotene stability and bioaccessibility[J]. Food & Function, 2019, 10(9): 5446−5460.
[69] ZHANG L J, ZAKY A A, ZHOU C F, et al. High internal phase Pickering emulsion stabilized by sea bass protein microgel particles: Food 3D printing application[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 131: 107744.
[70] YI Jiang, GAO Luyu, ZHONG Guitian, et al. Fabrication of high internal phase Pickering emulsions with calcium-crosslinked whey protein nanoparticles for β-carotene stabilization and delivery[J]. Food & Function, 2020, 11(1): 768−778.
[71] 武琼琼, 吴越, 沈雪, 等. 多层乳液递送系统的应用及研究进展[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(2): 218−224. [WU Qiongqiong, WU Yue, SHEN Xue, et al. Application and research progress of multilayer emulsion delivery system[J]. Food Research and Development, 2024, 45(2): 218−224.]
[72] ZHANG Chunlan, XU Wei, JIN Weiping, et al. Influence of anionic alginate and cationic chitosan on physicochemical stability and carotenoids bioaccessibility of soy protein isolate-stabilized emulsions[J]. Food Research International, 2015, 77: 419−425.
[73] 焦岩, 李大婧, 刘春泉, 等. 纳米脂质体提高叶黄素的稳定性[J]. 食品工业, 2019, 40(4): 24−27. [JIAO Yan, LI Dajing, LIU Chunquan, et al. The improvement of stability of lutein by nanoliposomes[J]. The Food Industry, 2019, 40(4): 24−27.]
[74] TAN C, ZHANG Y T, ABBAS S, et al. Modulation of the carotenoid bioaccessibility through liposomal encapsulation[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2014, 123: 692−700.
[75] 王心莹. 脂质体经皮递药系统的构建及其负载白藜芦醇和肌肽抗衰老作用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023. [WANG Xinying. Construction of liposomes transdermal drug delivery system and study on its anti-aging effects loaded with resveratrol and carnosine[D]. Changchun: Jilin University, 2023.]
[76] PAN Li, MENG Haojie, LI Jiaqi, et al. Enhancement of astaxanthin bioaccessibility by encapsulation in liposomes: An *in vitro* study[J]. Molecules, 2024, 29(8): 1687.
[77] PEDERSEN J N, FRISLEV H K S, PEDERSEN J S, et al. Structures and mechanisms of formation of liprotides[J]. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Proteins and Proteomics, 2020, 1868(11): 140505.
[78] SU W J, POLYAKOV N E, XU W H, et al. Preparation of astaxanthin micelles self-assembled by a mechanochemical method from hydroxypropyl β-cyclodextrin and glyceryl monostearate with enhanced antioxidant activity[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2021, 605: 120799.
[79] VIEGAS C, PATRÍCIO A B, PRATA J M, et al. Solid lipid nanoparticles vs. nanostructured lipid carriers: A comparative review[J]. Pharmaceutics, 2023, 15(6): 1593.
[80] BOONLAO N, RUKTANONCHAI U R, ANAL A K. Enhancing bioaccessibility and bioavailability of carotenoids using emulsion-based delivery systems[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2022, 209: 112211.
[81] GOMES G V L, SOLA M R, MAROSTEGAN L F P, et al. Physico-chemical stability and *in vitro* digestibility of beta-carotene-loaded lipid nanoparticles of cupuacu butter (*Theobroma grandiflorum*) produced by the phase inversion temperature (PIT) method [J]. Journal of Food Engineering, 2017, 192: 93−102.
[82] HELENA de ABREU-MARTINS H, ARTIGA-ARTIGAS M, HILSDORF PICCOLI R, et al. The lipid type affects the *in vitro* digestibility and β-carotene bioaccessibility of liquid or solid lipid nanoparticles[J]. Food Chemistry, 2020, 311: 126024.
[83] UENO K, MATSUSHITA T, SUGIHARA M, et al. Solid lipid nanoparticles of lutein with improved dissolution behavior and oral absorption[J]. Pharmaceutical Development and Technology, 2023, 28(9): 877−883.
[84] SHU Xin, ZHANG Liang, LIAO Wenyan, et al. Nanostructured lipid carriers (NLCs) stabilized by natural or synthetic emulsifiers for lutein delivery: Improved physicochemical stability, antioxidant activity, and bioaccessibility[J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134465.
[85] ROHMAH M, RAHMADI A, RAHARJO S. Bioaccessibility and antioxidant activity of β-carotene loaded nanostructured lipid carrier (NLC) from binary mixtures of palm stearin and palm olein[J]. Heliyon, 2022, 8(2): e08913.
[86] ZHENG Mengman, GUO Yi, LI Wenyun, et al. Medium chain triglycerides promote the uptake of β-carotene in O/W emulsions via intestinal transporter SR-B1 in Caco-2 cells[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(30): 9377−9387.
[87] ULUG E, NERGIZ-UNAL R. Dietary fatty acids and CD36-

mediated cholesterol homeostasis: Potential mechanisms[J]. Nutrition Research Reviews, 2021, 34(1): 64−77.
[88] HANIFF M, YAHAYA S A, AZIZ N S, et al. Development of carotenoid-rich mayonnaise using Carotino oil[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(9): e14688.
[89] PAN Lihua, WU Cuiling, LUO Shuizhong, et al. Preparation and characteristics of sucrose-resistant emulsions and their application in soft candies with low sugar and high lutein contents and strong antioxidant activity[J]. Food Hydrocolloids, 2022, 129: 107619.
[90] SAINI A, PANESAR P S, DILBAGHI N, et al. Lutein extract-loaded nanoemulsions: Preparation, characterization, and application in dairy product[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(11): e17082.
[91] TONIAZZO T, BERBEL I F, CHO S, et al. *β*-carotene-loaded liposome dispersions stabilized with xanthan and guar gums: Physico-chemical stability and feasibility of application in yogurt[J]. LWT - Food Science and Technology, 2014, 59(2): 1265−1273.
[92] SPOTTI M L, ACOSTA C A, CARRARA C R, et al. Influence of storage temperature and natural antioxidants addition on chia oil nutraceutical blends shelf life[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2024, 126(4): 2300179.
[93] 黄齐林, 温纪平. 火龙果粉对全麦粉凝胶 3D 打印特性的影响[J]. 粮食与油脂, 2024, 37(11): 111−116. [HUANG Q L, WEN J P. Effect of pitaya powder on 3D printing properties of whole wheat flour gel[J]. Cereals & Oils, 2024, 37(11): 111−116.]
[94] ZHONG Xu, WANG Kuiyou, CHEN Zhejin, et al. Incorporation of fucoxanthin into 3D printed Pickering emulsion gels stabilized by salmon by-product protein/pectin complexes[J]. Food & Function, 2024, 15(3): 1323−1339.
[95] 邓帅, 赵明慧, 郝春雪, 等. 叶黄素乳液凝胶 3D 打印间隔多层结构的构建及释放特性研究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(3): 133−142. [DENG Shuai, ZHAO Minghui, HAO Chunxue, et al. Construction and release characteristics of 3D printed spaced multilayer structure of lutein emulsion gel[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(3): 133−142.]
[96] SONG Jia, SUN Yuanda, WANG Haitao, et al. Preparation of high internal phase Pickering emulsion by centrifugation for 3D printing and astaxanthin delivery[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 142: 108840.