

食品功能因子靶向运载体系及其在食品中的应用

姚庆博^{1,2}, 梁艳彤^{1,2}, 吴佳敏^{1,2}, 刘欣桐^{1,2}, 廖 兰^{1,2}, 汪浪红^{1,2}, 曾新安^{1,2,3}, 黄燕燕^{1,2*}

¹佛山科学技术学院食品科学与工程学院 广东佛山 528225

²佛山科学技术学院广东省食品智能制造重点实验室 广东佛山 528225

³华南理工大学食品科学与工程学院 广州 510640

摘要 随着对功能食品中最重要的成分——功能因子研究的深入,大量的功能因子被开发应用到功能食品中。例如不饱和脂肪酸、多酚及类胡萝卜素等,因其特殊的理化性质,使自身的生物利用率低下,从而制约了其在食品中的应用。开发食品功能因子运载系统,提高其在生物体中的利用率便成为亟需解决的问题。本文以近几年食品功能因子运载体系研究为基础,系统归纳纳米乳状液、多层乳状液、固相脂质颗粒与凝胶颗粒的理化特性,阐述多种输送体系的作用机理和应用领域,提出针对功能因子易氧化、稳定性差和生物利用率低等问题,应建立靶向运送体系,改善功能因子,实现体内的靶向作用位点控制释放。

关键词 功能因子; 运载体系; 靶向运送; 缓控释放

文章编号 1009-7848(2024)06-0445-10 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2024.06.039

现代生活的飞速发展,使得人们更加注重自身的健康状况^[1]。在高压、高负荷的工作环境和不良饮食习惯的影响下,“亚健康”成为人体健康的常态。调查显示,在中国,亚健康人群占比达 75%^[2]。人们越来越意识到食品与健康之间的联系,这促使食品行业探索新的方法,在不损害食品质量和感官特性的前提下提高食品的营养价值和功能^[4]。

随着科技的进步和对功能性食物的研究,人们对功能因子的认识也深入,并获得较多的研究成果。这些成果用于功能食品的研发,使功能食品品种更加多样化,为生活在快节奏中的人们提供更多便利^[5]。许多具有重要生理功能的功能因子,因易受温度、氧气、光、湿度和消化代谢酶等因素影响,导致与食品基质的相容性变差,生物利用率降低,从而大大影响了功能食品的应用^[3]。研制能够保持功能性成分活力,增强其稳定性及生物利用率的功能因子运输系统,是功能性食品发展中急需攻克的难题^[4]。

近些年来,各种功能因子的分离技术、工艺手

段、设备仪器日益成熟^[6]。维持功能因子的活力,构建有效、稳定的靶向递送系统显得尤为重要^[7]。本研究通过梳理近年来国内外有关食品功能因子靶向递送运载体系,阐述其结构与性质,作用机理与适用范围,研究进展和在食品工业中的应用^[8],为食品及医药领域拓展功能性因素靶向运输系统的研究提供理论依据^[9]。

1 食品功能因子及靶向运送体系

食品功能因子是一种能够活化或调节机体功能的物质,在功能食品中起主要的生理功能^[10-11]。食品功能因子包括蛋白质、功能脂质、多糖、益生菌、矿物质和维生素等^[12],其对提高食物品质、调整机体的生理机能、防治疾病、调整人类的健康具有重要意义^[13]。食品中的功能性影响因素是多种多样的,其物理化学组成和功能各不相同,可为人类提供必需的营养^[14]。食品功能因子具有广泛的应用潜力,可作用于调节血脂、血糖、延缓细胞衰老、提高睡眠质量和促进生长发育等领域^[10]。然而,大多数功能因子存在敏感性高、可消化性差和综合利用率低等不足,是制约我国食品工业发展的“瓶颈”^[8]。功能因子对环境因素的敏感性高,可获得性差。这些都制约其在食品工业中的应用。因此,研制具有最大效用的靶向递送运载系统,从而保持食品功能因子活性与稳定性,提高生物利

收稿日期: 2023-06-09

基金项目: 广东省科技创新战略专项资金项目(2022B1212010015)

第一作者: 姚庆博,男,硕士生

通信作者: 黄燕燕 E-mail: huang_yanyan@fosu.edu.cn

用率是目前该领域亟待解决的问题^[9]。食品功能因子易受到环境因素的影响^[9],所以,要正确地选择运送体系来进行防护。运送系统通常可以起到保护、传递和缓控释放的功能^[15]。靶向递送是通过利用生物大分子的官能团,合成多种高分子材料来

包埋载体,这些材料存在生物可降解性、生物相容性、生物活性及安全性高等优点。靶向递送运载体系大体包括:纳米乳状液、固相脂质颗粒、多重乳状液和凝胶颗粒等^[2]。

表1 常见的功能因子运载体系横向对比

Table 1 Cross-sectional comparison of common functional factor delivery systems

体系名称	作用机理	适用范围	优势	不足	参考文献
纳米乳状液	通过改变蛋白质结构,降低乳液粒径形成纳米乳	适用大多数功能因子	可作为运输水溶性较差物质的载体	会造成聚集,絮凝,沉淀等现象	[16]–[30]
多重乳状液	通过不同界面电荷的相互作用,构成多层乳液	对功能性油脂和外部环境敏感的功能因子	高电荷密度 流变性,稳定性好	对于剪切敏感,安全性差	[32]–[38]
固体脂质颗粒	将功能因子包裹或夹嵌于脂质结构中形成运载体系	亲水性药物 亲脂性药物	降低产生急、慢性毒性的风险	载药量低 药物在贮存过程中析出	[39]–[49]
凝胶颗粒	凝胶网状结构具有吸附作用,达到对载体的缓释	脂溶性活性物质	保水性、溶胀性高 兼具流体性质	尺寸较大 质地粗糙	[50]–[64]

2 纳米乳状液运载体系

传统的乳化液通常由油和水两相构成,一相以液滴的形式存在于另一相。而纳米乳液则是由两个不相容的相位通过表面活性剂的作用而得到的分散相。其粒径较小(10~100 nm),但是,通过选用合适的乳化剂,可以调节粒径的尺寸和分布。乳状液特性主要由乳化剂性质来决定,比如电荷质量、表面厚度、表面流变性,以及对环境的影响等^[17]。相比传统乳状液,纳米乳状液的浊度和入射光的波长有很大的差别($d \leq \lambda$),因此,透射光强度较大^[18]。此外,颗粒尺寸越小,液滴之间的静电吸附能力越强,因此纳米乳状液的液滴聚集能力就越强,增强了整体稳定性^[20]。由于人体所需要的营养素大都含有疏水基,因此在食品行业中的应用存在着生物利用率低、稳定性和生物组织渗透性差等问题。而纳米乳液则能有效地防止环境因子的干扰,改善其生物利用率及稳定性,进而推动其在食品、医药领域的应用^[21]。

在食品工业中,纳米乳状液能有效地阻止功能因子与其它食品成分的化学作用,并能有效地阻止其降解,保证产品的品质和营养,并提高稳定性,延长保质期^[22]。自纳米乳状液运载体系应用在食品功能因子的靶向递送后,其研究进展迅速^[23]。

已广泛应用于功能食品开发、延长保质期、保护营养物质和封装体系等方面^[24]。如 Mazonde 等^[25]以多不饱和($\omega-3$)鱼油为原料,采用自发乳化法制备光学透明的纳米乳。Almasi 等^[26]采用低能乳化法制备亚麻籽油水包纳米乳强化酸奶,结果显示:11个月后亚麻籽油纳米乳强化酸奶的透明度有所提高且物理特性稳定,没有油相分离的迹象。Chen 等^[27]构建植物甾醇结构的温敏海藻油纳米乳液具有较低鱼腥味和较好的氧化稳定性,可使功能性食品、饮料和调味品等液体食品系统相结合。江连州等^[28]开发了一种能改善深海鱼油的可溶性、降低其腥味、防止被过早氧化的纳米乳。Hu 等^[29]研制的紫苏油纳米乳液具有较强的储藏稳定性、生物利用度。能够促进紫苏油在人体内消化吸收,给纳米乳状液用于功能保健食品提供实践性依据。Alkhader 等^[30]利用壳聚糖-果胶纳米粒子包裹姜黄素,可以有效地防止姜黄素在较低的 pH 值下提前释放。

3 多层乳状液运载体系

多层乳状液是指两种以上的乳化剂,经静电吸附,在乳液中形成一定的界面厚度。它具有更厚、更致密的界面层,可以极大地改善乳化溶液的

稳定性。由于其界面电荷浓度高,其絮凝和聚合稳定性也得到提高;同时,它的界面流变性很好,可以降低其奥氏熟化,改善功能组分的物理稳定性^[31]。多层乳状液的界面很复杂,其多层边界的形成取决于液滴所携带的电荷和乳化状态^[32]。其作用机制是以一种生物高分子作为乳化剂,在乳液液滴上形成第一个分界面层,使电荷相反的聚电解质与第一个分界面层发生交互作用,形成双层

界面,即双层乳液,如图 1。这时,乳液滴上的电荷正、负会出现相反的变化,这种方法被叫做层-层(Layer-by-layer,LBL)静电沉积法^[32-33]。多层乳液物理化学稳定性好,对包埋成分的保护作用强^[31]。它能稳定食物的结构,避免由于 pH 值、重金属、热处理与速冻等因素对食品质量造成的损害;另外,也可以将那些容易被破坏或分解的生物活性物质包裹起来^[33]。

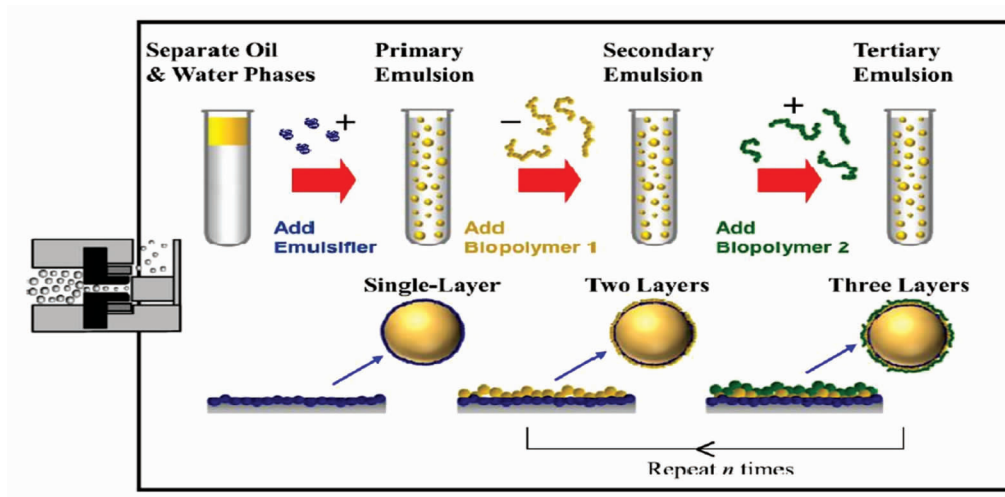


图 1 应用层层静电沉积法制备多层乳液^[33]

Fig.1 Application of LBL electrostatic deposition to prepare multilayer emulsions^[33]

随着对多层乳液的研究不断深入,科研人员利用其不同特性发挥运载作用,如:Lim 等^[34]采用 WPI (Whey protein isolate)与阿拉伯胶包埋的葵花子油制成双层乳液,结果表明,在 pH 0.9~1.8 的情况下,该产品仍能在胃部的酸性环境下维持包埋结构的稳定性。Zhang 等^[35]采用美拉德反应共价合成以 SPI (Soy protein isolate) 与葡聚糖为原料的双层乳液,使其与 SPI 乳液、SPI-葡聚糖乳液进行了比较,结果表明,双层乳液在冻融稳定性上有明显的改善。Acevedo-Fani 等^[36]用乳铁蛋白-海藻酸盐合成白藜芦醇双层乳液,并与未包裹的白藜芦醇进行比较,结果表明,双层乳液对易氧化的功能组分有良好的保护作用。Lim 等^[37]通过对比单层和逐层界面结构下高亲水固体乳液和海藻糖高 DE 麦芽糊精混合物对叶黄素和全反式 β -胡萝卜素的包封能力的研究。结果表明,逐层包装的乳液表现出更高的稳定性,证实了 LBL 界面层可以增强配方食品和其它生物材料中非结晶亲脂性生物

活性化合物的稳定性。

4 固相脂质颗粒运载体系

固体脂质颗粒(Solid lipid nanoparticle SLN)是由天然、半合成或合成的脂肪酸组成,是一种安全、可降解的载体^[3]。固体脂质颗粒具有良好的生物相容性,但易发生降解,不能保证装载后到有效工作位置才释放,从而降低了掩埋材料的利用率^[38]。以乳化剂为基础的固相脂是一种水相乳化脂^[10]。通过乳化剂、油相类型和配比的选择可以调节固体脂质粒子的界面分布,优化运载体系中电荷分布、界面层厚度及渗透性等^[39]。固相脂质颗粒平均粒径大多在纳米级别,相比其它载体,在制备过程中有毒聚合物和有机成分残留少^[38]。利用固相脂质颗粒将亲水性和亲脂性的药物包裹起来,从而延长药物的释放^[40]。通过携带的蛋白或肽释放到特定的目标器官以实现特殊的功能,保护不稳定和敏感的功能因子,使其免受不利因素的破

坏^[41]。固相脂质颗粒常用来包埋敏感化合物,例如香精、着色剂、抗生素和脂肪酸等,以使这些化合物稳定,使其释放的时间更长。也可以用来包埋生物活性肽^[43-45]。Singh 等^[46]构建了番茄红素纳米结构脂质载体并评价了其肠道吸收特性,如图 2。该载体的脂质核可刺激乳糜微粒携带番茄红素,实现跨膜转运。Chen 等^[47]制备了虾青素脂质体,用于糖尿病、肾病的治疗。

5 凝胶颗粒载体

凝胶是一种在溶胶或溶液中以共价键结合而成的具有空间网状结构的高分子物质,进而作为分散介质的运输体系^[49]。它的光学性能、流变性、稳定性和控制释放性能都与常规的乳剂有很大的不同^[50]。由于凝胶颗粒水相的共价键特性、浊度和黏性都很高,从而产生了热不稳定性,易发生絮凝、聚结与沉淀等现象^[51]。凝胶具有很好的保水性和溶胀性,可以起到很好的保护和缓释作用,可以作为一种功能因子传递载体,将脂溶性活性物质包裹起来^[52]。以蛋白质凝胶为例:蛋白中的游离氨基酸与交联剂作用,使其形成具有蛋白特征的网络结构,起到吸附作用,固定运载物质,达到缓控释放的效果^[53]。由于其内部体积大,稳定性好,材料的孔隙度均匀,因此在食品、医药、生物组织工程和化妆品等领域得到了广泛的应用^[54]。

凝胶颗粒载体能有效地解决某些食品水溶性较差、化学性能不稳定、生物利用率较低等问题^[5]。吴晓静^[55]采用高压均质技术,将乳清分离蛋白凝胶颗粒制成高黏度、高稳定性的 Pickering 乳液,如图 3。Jiao 等^[56]以花生分离蛋白与谷氨酰胺转氨酶为原料,采用高压均质法将其粉碎,制备了凝胶微粒。这种凝胶微粒所构成的网络结构使得乳液不会凝结,最后可获得 87% 的食用油相含量。Fardous 等^[57]开发了一种油包凝胶乳液作为透皮给药系统,通过肝素固定明胶制备的纳米乳液分散在肉豆蔻酸异丙酯中,结果表明,透皮应用相比水溶液,油包乳液凝胶可以更好的渗透角质层。

6 运载体系在食品工业中的应用

6.1 纳米乳状液运载体系在食品工业的应用

纳米乳状液是一种广泛应用于化工、材料、生



图 2 功能因子运输体系体外消化实验过程^[46]
Fig.2 Functional factor transport system
in vitro digestion experimental procedure^[46]

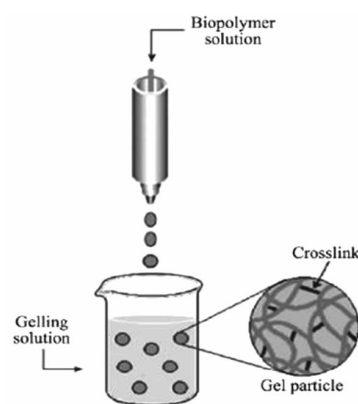


图 3 高压均质技术制备凝胶颗粒^[55]
Fig.3 Preparation of gel particles by high-pressure
homogenization technique^[55]

物、环境等方面的分散体系,由于其稳定性好、分散均匀、粒径小等优点,近年来在食品工业中得到了广泛的应用^[21-25]。现有的应用包括作为营养因子的递送制剂、维生素制剂,在乳制品中添加微量元素等^[27]。作为高效、安全的功能因子递送体系,纳米乳状液是一种具有高适口性、高吸收率和贮藏稳定的生物活性物质递送系统,特别适合于封装疏水性营养物质并将其纳入食品和药品产品中具有保质期长、稳定性好和靶向性缓释的特点,通常设计用于在食品中储存期间保留生物活性化合物,可以最低限度地改变食品的外观和口感,保留原始风味和特性。纳米乳状液可用于封装、防护和递送各种具有抗氧化或抗菌活性的功能因子,其抗菌活性归因于与细胞质膜的脂质部分融合并破坏其结构和功能,从而导致细胞裂解和死亡。通过抑制治病腐败菌的生长来提高食品的质量,延长其保质期,以及食品的感官特性等^[30]。Guttoff 等^[59]利用自发乳化法制备出一种能显著改善维生素 D 的水包油纳米乳液。Otoni 等^[60]采用果胶与木瓜泥

制备了可食用的复合肉桂醛纳米乳液膜,验证了该膜在绿色食品中的应用前景。

6.2 多层乳状液运载体系在食品工业中的应用

多层乳状液具有良好的光学透明性,提高了疏水性化合物的溶解性,扩大生物利用率^[32]。因此,多层乳状液具有更好的封装、保护和传递作用,特别是在溶性营养物质的包埋、传递、抗菌、抗氧化、营养药物的载体等领域得到了广泛的重视,并取得了许多具有探索性的应用研究^[36]。多层乳状液可以通过口服的方式,除了起到提高功能因子保护程度和稳定性外,还掩盖了功能因子的一些原本风味,使服用时适口性更高。另外,多层乳状液液滴相比普通乳液有着复杂的相间界面,因此可以用来祛除一些食品中的异味,改进油性较大食品的适口性,或者可以作为抗氧化防霉变的生物薄膜来使用。Xu等^[61]在pH值为4条件下,采用静电法合成的姜黄素乳液具有较好的稳定性,同时具有99.9%的装载率和生物利用率。Wang等^[62]通过构建多不饱和脂肪酸的多层乳状液载体,提高了多不饱和脂肪酸的抗氧化性和储存期的稳定性。

6.3 固体脂质颗粒在食品工业中的应用

近年来,SLN由于具有靶向递送稳定可靠、封装率及载量高和较好的生物相容性等特点在食品应用中越来越受到人们的关注。固体脂质颗粒主要集中在脂溶性维生素包埋、保护和传递,也包括化学稳定性较低的亲油性物质的传递,如 ω -3脂肪酸或番茄红素等^[40]。尤其适合于在食物贮存过程中,对具有低化学稳定性的脂溶性化合物,如: β -胡萝卜素、蕃茄红素、柠檬醛以及多不饱和脂肪酸等^[44]。脂质颗粒是一种具有一定粒度范围的固体,由于粒径较小,其在食品应用中可以避免沉降及分层现象的产生^[45]。其优点是能有效地抑制包裹物质的释放,降低降解速度,达到延长生物活性成分的释放时间,可以用于口香糖香味的释放^[48]。杨振等^[63]采用乳木果油-SLN作为载体,将亲脂活性物质 α -生育酚包埋,其包埋率可达95.11%,研究表明乳木果油SLN不仅可以作为脂溶性功能因子载体,还能有效运载其它营养物质。Singh等^[46]构建了番茄红素纳米结构脂质载体,实现跨膜转运。

6.4 凝胶固体颗粒在食品工业中的应用

凝胶可用作乳化剂和稳定剂,以改善食品乳液、发泡系统的稳定性,用于Pickering乳液制备、功能因子难溶解,容易氧化等问题^[50]。通过对功能因子进行凝胶负载,可以提高其溶解性与抗氧化性,凝胶受环境影响显著,利用其在外界刺激下溶胀实现控制功能因子的释放^[54]。由于其特殊的流变特性,在食品的结构、配方设计和感官评价等方面得到了广泛的应用^[57]。特别是亲脂性功能因子的运输系统,凝胶粒子能够使食物系统中的亲油性分子分布均匀,同时还能起到保护胃部的作用,并在消化系统中的某些部位释放出生物活性分子,从而增强其生物利用率^[63]。王超^[64]将蛋白与胶体混合后,制成胶体,经微粒化工艺加工,得到的颗粒与仿真物无二,且具有油脂的风味。刘迪茹^[65]以乳清蛋白为原料,将鱼油包裹成凝胶微粒,用于低脂肪酸奶的研制,所制成的酸奶和全脂酸奶在感官评定上没有显著差别。Leon等^[66]制备了乳清分离蛋白/海藻酸钠复合凝胶纳米颗粒,并将膳食纤维类物质添加到凝胶颗粒中,既提高了凝胶颗粒的黏弹性和适口性,又实现了对膳食纤维的荷载,是极具潜力的老年食品。

7 结论与展望

目前国内外对食品功能因子运载体系的研究处于基础阶段,相关研究较多集中于运载体系的构成、制备机理方法、贮存条件及其理化特性的影响方面。大多研究是在简单的模型溶液进行的,缺乏相关动物实验或人体实验的前沿报道。整体而言,功能因子靶向递送运载体系相较于传统运载体系具有更好的理化稳定性和适用性。选用特定功能因子输送体系,以提高功能因子的稳定性、生物利用率及实现功能因子的控制释放,更好地用于食品的研发、生产、加工、贮存和销售等方面。在食品工业中有着很好的应用前景。随着消费者对食物的营养和功能需求的日益增长,功能因子运输系统的研究已成为一个热门课题。根据现有成果可以预测到未来食品功能因子载体发展的如下几个方面:1)为了进一步挖掘食品功能因子运载体系在功能食品领域的发展潜力,建议未来重点关注功能性载体与食品基质中的其它大分子之

间可能相互作用的机制研究,不断优化及探究新型靶向递送运载体系的制备方法与作用机理,以达到有效改善食品功能因子物理稳定性、化学稳定性和提高生物利用率的目的。2)建立多种运输系统,以克服食物功能因素对环境的负面影响,充分发挥其活性,并利用该系统的释放特性,达到对食物功能性因素的靶向递送。3)在现有的研究基础上,改善运载体系的制备方法,提高生物利用率。同时,确定合适操作方式及生产规模为实现食品工业批量生产打下坚实基础。4)开发新的环保、低成本的应用材料。产学结合,使科研成果更好地用于实际的产品研发和制造。

参 考 文 献

- [1] 沈思彤. 新时期食品营养与健康研究[J]. 食品安全导刊, 2022(20): 116-118.
SHEN S T. Study on food nutrition and health in the new period [J]. China Food Safety Magazine, 2022(20): 116-118.
- [2] 陈春蕾, 徐娜, 张雨, 等. 大学生颈椎亚健康相关研究进展[J]. 卫生职业教育, 2022, 40(1): 118-119.
CHEN C L, XU N, ZHANG Y, et al. Research progress on cervical sub-health of college students [J]. Health Vocational Education, 2022, 40(1): 118-119.
- [3] 许朵霞, 曹雁平, 齐雅萌, 等. 食品功能因子输送体系的研究进展[J]. 食品工业科技, 2014, 35(11): 4.
XU D X, CAO Y P, QI Y M, et al. Development of food functional component delivery system [J]. Science and Technology of Food Industry, 2014, 35(11): 4.
- [4] 周皓, 廖毅凡. 几种功能因子的提取方法研究综述[J]. 现代食品, 2019(19): 51-53.
ZHOU H, LIAO Y F. A review of research on extraction methods of several functional factors [J]. Modern Food, 2019(19): 51-53.
- [5] 李婷婷, 朱勇辉, 李欢君, 等. 功能性食品的研究进展[J]. 现代食品, 2022, 28(12): 79-81.
LI T T, ZHU Y H, LI H J, et al. Research progress of functional food [J]. Modern Food, 2022, 28(12): 79-81.
- [6] HU B LIU X, ZHANG C, et al. Food macromolecule based nanodelivery systems for enhancing the bioavailability of polyphenols [J]. Food Drug Anal, 2017, 25(1): 3-15.
- [7] QIN T, HU S, SMINK A M, et al. Inclusion of extracellular matrix molecules and necrostatin-1 in the intracapsular environment of alginate-based microcapsules synergistically protects pancreatic β cells against cytokine-induced inflammatory stress [J]. Acta Biomaterialia, 2022, 146(1): 434-449.
- [8] 陈杨玲, 焦叶, 崔波, 等. 蛋白基植物多酚纳米输送载体研究进展[J]. 食品与机械, 2022, 38(4): 8-14.
CHEN Y L, JIAO Y, CUI B, et al. Research progress of protein-based plant polyphenol nano-delivery carriers [J]. Food and Machinery, 2022, 38(4): 8-14.
- [9] 艾华, 常翠青. 运动营养食品中营养成分和功能因子研究进展[J]. 食品科学技术学报, 2017, 35(3): 16-24, 49.
AI H, CHANG C Q. Research progress on nutritional components and functional factors in sports nutrition food [J]. Journal of Food Science and Technology, 2017, 35(3): 16-24, 49.
- [10] 郭子楠, 潘京金, 贺明君, 等. 降胆固醇功能性食品的研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(1): 269-277.
GUO Z N, PAN J J, HE M J, et al. Advances in research on cholesterol-lowering functional foods [J]. Food Science, 2022, 43(1): 269-277.
- [11] 赵金勇, 张沛. 功能性食品对肠道菌群调节作用的研究进展[J]. 现代食品, 2021(16): 40-43, 49.
ZHAO J Y, ZHANG P. Research progress on the regulation of functional food on intestinal flora [J]. Food Science, 2021(16): 40-43, 49.
- [12] HE W, LU Y, QI J P, et al. Food proteins as novel nanosuspension stabilizers for poorly water-soluble drugs [J]. Pharmaceutics, 2013, 441(1/2): 269-278.
- [13] 孙亚欣, 郑晓燕, 郑丽丽, 等. 大豆分离蛋白-茶皂素复合乳化剂制备山茶油纳米乳液及其性质研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(22): 27-34, 42.
SUN Y X, ZHENG X Y, ZHENG L L, et al. Preparation of Camellia oil nanoemulsion by soy protein isolate-tea saponin compound emulsifier and properties of nanoemulsion [J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(22): 27-34, 42.

- [14] JIBRIL H, ABUBAKAR S. Basis for classification of functional foods: A review[J]. Bayero Journal of Pure and Applied Sciences, 2021, 13(1): 138–144.
- [15] GALANAKIS C M. Functionality of food components and emerging technologies[J]. Foods, 2021, 10(1): 128.
- [16] FERNANDES S S, COELHO M S, DE LAS MERCEDES SALAS –MELLADO M. Bioactive compounds as ingredients of functional foods: Polyphenols, carotenoids, peptides from animal and plant sources new[M]. UK: Woodhead Publishing, 2019: 129–142.
- [17] XI Y K, ZHOU Y X, LUO Z G, et al. pH-Responsive Emulsions with β -cyclodextrin/vitamin E assembled shells for controlled delivery of polyunsaturated fatty acids[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2019, 6437: 11931–11941.
- [18] LIU Y, LI X, SANG S, et al. Construction of functional soybean peptide-cyclodextrin carboxylate nanoparticles and their interaction with porcine pancreatic α -amylase[J]. Food Research International, 2022, 162: 112054.
- [19] WOOSTER T J, ACQUISTAPACE S, METTRAUX C, et al. Hierarchically structured phase separated biopolymer hydrogels create tailorable delayed burst release during gastrointestinal digestion[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2019, 553(6): 308–319.
- [20] YALÇINÖZ Ş, ERCELEBI E, SOLANS C, et al. Screening of extra virgin olive oil-in-bitter orange juice (O/W) nano-emulsions stabilized with different food-grade surfactants: A model system for natural daily use salad dressing[J]. Italian Journal of Food Science, 2020, 32(4): 873–892.
- [21] 江连洲, 李佳妮, 姜楠, 等. 纳米乳液制备技术及功能应用研究进展[J]. 中国食物与营养, 2017, 23(6): 33–38.
- JIANG L Z, LI J N, JIANG N, et al. Research advancement of preparation and application of nanoemulsion[J]. Food and Nutrition in China, 2017, 23(6): 33–38.
- [22] GASA F A, ODRIOZOLA S I, OMS-OLIU G, et al. Impact of emulsifier nature and concentration on the stability of β -carotene enriched nanoemulsions during *in vitro* digestion[J]. Food & Function, 2019, 10(2): 713–722.
- [23] VINEET K R, NIDHI M, KULDEEP S Y. Nanoemulsion as pharmaceutical carrier for dermal and transdermal drug delivery: Formulation development, stability issues, basic considerations and applications [J]. Journal of Controlled Release, 2018, 270(11): 203–225.
- [24] ARBAIN N H, SALIM N, MASOUMI H R F, et al. *In vitro* evaluation of the inhalable quercetin loaded nanoemulsion for pulmonary delivery[J]. Drug Delivery & Translational Research, 2019, 9(2): 497–507.
- [25] MAZONDE P, KHAMANGA SMM, WALKER RB. Design, optimization, manufacture and characterization of efavirenz-loaded flaxseed oil nanoemulsions [J]. Pharm, 2020, 12(9): 797.
- [26] ALMASI K, ESNAASHARI S S, KHOSRAVANI M, et al. Yogurt fortified with omega-3 using nanoemulsion containing flaxseed oil: Investigation of physicochemical properties[J]. Food Sci Nutr, 2021, 9(11): 6186–6193.
- [27] CHEN X W, CHEN Y J, WANG J M, et al. Phytosterol structured algae oil nanoemulsions and powders: Improving antioxidant and flavor properties[J]. Food Funct, 2016, 7(9): 3694–3702.
- [28] 江连洲, 蔡玉曼, 马春芳, 等. 鱼油纳米乳液运载体系构建与稳定性研究[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 387–395.
- JIANG L Z, XI Y M, MA C F, et al. Formation and stability of fish oil enriched biocompatible nano-emulsion [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 387–395.
- [29] HU M, XIE F, ZHANG S, et al. Effect of nanoemulsion particle size on the bioavailability and bioactivity of perilla oil in rats [J]. J Food Sci, 2021, 86(1): 206–214.
- [30] ALKHADER E, BILLA N, ROBERTS C J. Mucoadhesive chitosan-pectinate nanoparticles for the delivery of curcumin to the colon [J]. AAPS Pharm-SciTech, 2017, 18(4): 1009–1018.
- [31] ĐORĐEVIĆ V, BALANČ B, BELŠČAK-CVITANOVIĆ A, et al. Trends in encapsulation technologies for delivery of food bioactive compounds[J]. Food Engineering Reviews, 2015, 7(4): 452–490.
- [32] LIU F G, WANG D, SUN C X, et al. Utilization

- of interfacial engineering to improve physicochemical stability of β -carotene emulsions: Multilayer coatings formed using protein and protein-polyphenol conjugates[J]. *Food Chemistry*, 2016, 205(2): 129-139.
- [33] 盛布雷. pH响应型 β -胡萝卜素双层乳液的制备及其性能研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
SHENG B L. Preparation and properties of pH responsive β -carotene bilayer emulsion[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [34] LIM A S L, ROOS Y H. Stability of flocculated particles in concentrated and high hydrophilic solid layer-by-layer (LBL) emulsions formed using whey proteins and gum Arabic[J]. *Food Research International*, 2015, 74(4): 160-167.
- [35] ZHANG Z Y, WANG X B, YU J, et al. Freeze-thaw stability of oil-in-water emulsions stabilized by soy protein isolate-dextran conjugates[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2017, 78(12): 241-249.
- [36] ACEVEDO-FANI A, SILVA H D, SOLIVA-FORTUNY R, et al. Formation, stability and antioxidant activity of food-grade multilayer emulsions containing resveratrol[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 71(5): 207-215.
- [37] Lim, A S L, ROOS, Y H, et al. Carotenoids stability in spray dried high solids emulsions using layer-by-layer (LBL) interfacial structure and trehalose-high DE maltodextrin as glass former[J]. *Journal of Functional Foods*, 2017, 33(3): 32-39.
- [38] WANG T R, XUE J Y, HU Q B, et al. Preparation of lipid nanoparticles with high loading capacity and exceptional gastrointestinal stability for potential oral delivery applications[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2017, 507(7): 119-130.
- [39] SHTAYR, SCHWARZ K. Development and characterization of solid lipid nanoparticles (SLNs) made of cocoa butter: A factorial design study[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 231(3): 30-41.
- [40] MILSMANN J, OEHLKE K, GREINER R, et al. Fate of edible solid lipid nanoparticles (SLN) in surfactant stabilized o/w emulsions[J]. *Colloids and Surfaces A-physicochemical and Engineering Aspects*, 2018, 558(5): 615-622.
- [41] 姜燕蓉, 刘锴锴, 齐筱莹, 等. 虾青素的生物功效及其载体体系研究现状[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(13): 7.
JIANG Y R, LIU K K, QI X Y, et al. Biological activities and delivery systems of astaxanthin[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(13): 7.
- [42] 刘晓静, 贾竞夫, 孙丽芳, 等. 基于超临界CO₂抗溶剂技术的姜黄素固体脂质纳米粒研究[J]. *中药材*, 2019, 42(7): 1621-1624.
LIU X J, JIA J F, SUN L F, et al. Study on curcumin solid lipid nanoparticles based on supercritical CO₂ antisolvent technology[J]. *Journal of Chinese Medicinal Materials*, 2019, 42(7): 1621-1624.
- [43] MOHAN A, RAJENDRAN S R C K, THIBODEAU J, et al. Liposome encapsulation of anionic and cationic whey peptides: Influence of peptide net charge on properties of the nanovesicles[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 87(8): 40-46.
- [44] LEWIES A, WENTZEL J F, JORDAAN A, et al. Interactions of the antimicrobial peptide nisin Z with conventional antibiotics and the use of nanostructured lipid carriers to enhance antimicrobial activity[J]. *International Journal of Pharmaceutics*, 2017, 526(1): 244-253.
- [45] CHEN P, ZHANG H CHENG S, et al. Development of curcumin loaded nanostructured lipid carrier based thermosensitive in situ gel for dermal delivery[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016, 506(6): 356-362.
- [46] SINGH A, NEUPANE Y R, PANDA B P, et al. Lipid based nanoformulation of lycopene improves oral delivery: Formulation optimization, ex vivo assessment and its efficacy against breast cancer[J]. *Journal of Microencapsulation*, 2017, 34(4): 416-429.
- [47] CHEN Z, LI W, SHI L, et al. Kidney-targeted astaxanthin natural antioxidant nanosystem for diabetic nephropathy therapy[J]. *European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics*, 2020, 156(9): 143-154.
- [48] 毛丽娟, 简俊丽, 高彦祥, 等. 固体脂质颗粒及其在食品中的应用与研究现状及展望[J]. *食品科技*, 2015, 40(4): 66-70.
MAO L J, JIAN J L, GAO Y X, et al. The application and research status of solid lipid particles in food industry and expectation[J]. *Food Science and Technology*, 2015, 40(4): 66-70.
- [49] 冯有楠, 苏春霞, 叶晶, 等. 乳液凝胶的力学性质及应用研究进展[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(11): 268-276.

- FENG Y N, SU C X, YE J, et al. Research progress in the mechanical properties and application of emulsion-gel[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2018, 18(11): 268-276.
- [50] WU W H, KONG X Z, ZHANG C M, et al. Improving the stability of wheat gliadin nanoparticles - effect of gum arabic addition[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 80(1): 78-87.
- [51] LEHMANN M, KRAUSE P, MIRUCHNA V, et al. Tailoring PNIPAM hydrogels for large temperature-triggered changes in mechanical properties[J]. *Colloid and Polymer Science*, 2019, 297(4): 633-640.
- [52] HOU J J, GUO J, WANG J M, et al. Effect of interfacial composition and crumbliness on aroma release in soy protein /sugar beet pectin mixed emulsion gels[J]. *Sci Food Agric*, 2016, 96(13): 4449-4456.
- [53] ARAIZA-CALAHORRA A, AKHTAR M, SARKARA. Recent advances in emulsion-based delivery approaches for curcumin: From encapsulation to bioaccessibility[J]. *Trends Food Sci Technol*, 2018, 71(11): 155-169.
- [54] DICKINSON E. Microgels-an alternative colloidal ingredient for stabilization of food emulsions[J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2015, 43(2): 178-188.
- [55] 吴晓静. 乳清分离蛋白纳米颗粒的制备及其稳定 Pickering 乳液的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- WU X J. Preparation of whey protein isolate nanoparticles and study on stabilized pickering emulsion[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [56] JIAO B. High-internal-phase pickering emulsions stabilized solely by peanut-protein-isolate microgel particles with multiple potential applications [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2018, 57(30): 9274-9278.
- [57] FARDOUS J, YAMAMOTO E, OMOSO Y, et al. Development of a gel-in-oil emulsion as a transdermal drug delivery system for successful delivery of growth factors[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 2021, 132(1): 95-101.
- [58] 孙婉秋, 陈雨露, 任爽, 等. 食品级凝胶颗粒的制备及应用研究进展[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(1): 7.
- SUN W Q, CHEN Y L, REN S, et al. Research progress on the preparation and application of food-grade gel particles[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(1): 7.
- [59] GUTTOFF M, SABERI A H, MCCLEMENTS D J. Formation of vitamin D nanoemulsion - based delivery systems by spontaneous e-mulsification: Factors affecting particle size and stability[J]. *Food Chemistry*, 2015, 171(171): 117-122.
- [60] OTONI C G, MOURA M R, AOUADA F A, et al. Antimicrobial and physical-mechanical properties of pectin/papaya puree/ cinnamaldehyde nanoemulsion edible composite films[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 63(10): 735-735.
- [61] XU G R, WANG C N, YAO P. Stable emulsion produced from casein and soy polysaccharide compacted complex for protection and oral delivery of curcumin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2017, 71(5): 108-117.
- [62] WANG C X, SUN C X, LU W, et al. Emulsion structure design for improving the oxidative stability of polyunsaturated fatty acids[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2020, 19(6): 2955-2971.
- [63] 杨振, 李曼, 慕鸿雁, 等. 装载 α -生育酚的乳木果油固体脂质纳米颗粒的制备与表征[J]. *食品科学*, 2021, 42(18): 7-14.
- YANG Z, LI M, MU H Y, et al. Preparation and evaluation of shea butter solid lipid nanoparticles loaded with α -tocopherol[J]. *Food Science*, 2021, 42(18): 7-14.
- [64] 王超. 亚麻籽胶与淀粉调控乳状液中油滴聚集制备脂肪替代物及其应用[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- WANG C. Preparation of whey protein isolate nanoparticles and study on stabilized pickering emulsion[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.
- [65] 刘迪茹. 乳清蛋白脂肪替代物的制备及应用[D]. 吉林: 吉林大学, 2014.
- LIU D R. The preparation and application of whey protein based fat replacer[D]. Jilin: Jilin University, 2014.
- [66] LEON A M, AGUILERA J M, PARK D J. Mechanical, rheological and structural properties of

fiber-containing microgels based on whey protein (11): 571–579.
and alginate[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 207

Target Delivery System of Food Functional Factors and Its Application in Food

Yao Qingbo^{1,2}, Liang Yantong^{1,2}, Wu Jiamin^{1,2}, Liu Xintong^{1,2}, Liao Lan^{1,2},
Wang Langhong^{1,2}, Zeng Xinan^{1,2,3}, Huang Yanyan^{1,2*}

¹*School of Food Science and Engineering, Foshan University of Science and Technology, Foshan 528225, Guangdong*

²*Guangdong Provincial Key Laboratory of Intelligent Food Manufacturing, Foshan 528225, Guangdong*

³*School of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640*

Abstract With the continuous research on functional factors, the essential components in functional foods, numerous functional factors have been developed and applied to functional foods. For instance, unsaturated fatty acids, polyphenols and carotenoids have their own low bioavailability due to their special physicochemical properties, thus restricting their application in food. Therefore, the development of functional factor transport systems to improve the utilization of functional factors in food organisms has become an urgent problem to be solved. In this paper, we systematically summarize the physicochemical properties of nanoemulsions, multilayer emulsions, solid-phase lipid particles, and gel particles based on recent research on functional factor delivery systems and explain the mechanism of action and application of various delivery systems. The target delivery system could help improve functional factors' problems and achieve the controlled release of targeted action sites *in vivo*. Conclusively, this paper aims to lay a theoretical basis for developing and applying targeted delivery systems for functional factors in the food industry.

Keywords functional component; delivery system; targeted delivery; slow controlled release