

天然多糖基纳米递送载体在功能性食品中的应用

夏明杰, 杨立娜*, 余科金, 王胜男, 何余堂, 刘贺

(渤海大学食品科学与工程学院 辽宁省粮谷类食品生物高效转化工程研究中心 辽宁锦州 121013)

摘要 天然多糖具有成本低,应用广泛,生物相容性高和可降解性等优点,可作为功能因子的纳米递送载体,用于提高功能因子的生物利用度和理化稳定性。本文概述纳米技术的起源和多糖基纳米载体的优势,以及不同类型的多糖基纳米载体的制备方法、形成机理、结构特征、封装率、释放率等,探讨多糖基纳米载体在功能性食品研究方面的潜在问题 and 应用前景。以期为高效制备具有生物功能性的多糖基纳米载体提供借鉴。

关键词 天然多糖; 纳米递送载体; 功能性食品

文章编号 1009-7848(2025)01-0442-13 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2025.01.041

多糖是由醛糖或酮糖通过糖苷键连接而成的线性或分枝链状聚合物。自然界中多糖来源广泛,如动物中的壳聚糖、软骨素,植物中的果胶、瓜儿豆胶,微生物中的葡聚糖、黄原胶,以及藻类中的海藻多糖等^[1]。绝大多数天然多糖都带有如羟基、羧基、氨基等亲水性基团,具有高水溶性、高分散稳定性,同时多糖分子链有多种类型的基团,经化学和生物方法修饰,可获得相应的功能化多糖超分子衍生物。天然多糖除了具有结构稳定性高,生物相容性好,可生物降解等优点之外,还是维生素、必需脂肪酸、香料、矿物质、抗菌剂、天然食品着色剂、抗氧化剂等功能因子的良好递送载体^[2]。

糖纳米技术是一个新兴且迅速发展的领域,作为纳米缓控载体在延缓或控制功能因子释放,稳定和保護功能因子活性成分,促进功能因子吸收和靶向定位等方面发挥重要作用^[3]。本文主要概述以天然多糖为原料制备的纳米级功能因子递送载体的优缺点,以及以天然多糖基纳米胶束、纳米纤维、纳米颗粒、纳米乳液及纳米水凝胶为代表的纳米制剂的研究进展,讨论天然多糖作为纳米级递送载体在功能性食品中的应用现状及发展前景。

1 纳米技术的起源

纳米技术最早源于美国著名物理学家

Richard Feynman 在 1959 年美国物理学会报告中,提出的原子组装概念。随后,日本科学家 Norio Taniguchi 于 1974 年用“纳米技术”来描述精细机械加工。1990 年,召开的第一届纳米科学技术国际会议,意味着纳米技术的诞生^[4]。1999 年,国家纳米技术组织将其正式定义为应用科学知识在纳米尺度范围内操纵和控制物质,以利用与尺寸和结构相关的特性和现象^[5]。纳米技术的发展非常迅速,目前纳米技术已经为食品工业打开了一个全新的大门,且已应用在食品加工、包装、质量、安全和营养等各个方面。

2 多糖基纳米递送载体的优势

多糖是自然界存在最广泛的一类有机物,是由醛糖或酮糖通过糖苷键连接而成的天然高分子多聚物。由于多糖分子表面富含羟基,易通过修饰作为药物递送载体^[6]。多糖基纳米载体具有高表面积体积比和表面易修饰性,这增强了纳米载体在应用中的优势。对天然聚合物纳米载体表面改性后可以使其顺利通过胃肠道屏障到达靶向部位^[6]。天然多糖聚合物载体具有合成操作简单,分子结构明确,亲疏水嵌段可调,载量高等优势,形成的纳米颗粒具有尺寸可控,稳定性好,血液循环时间长,递送效率显著,药代动力学效果好,生物安全性高等诸多优点,几乎是研究最广泛的药物递送系统之一^[7]。

天然多糖基纳米载体封装功能因子后,可以保护其免受胃肠道 (Gastrointestinal tract, GIT) 中

收稿日期: 2024-01-25

基金项目: 辽宁省自然科学基金面上项目(2023-MS-293)

第一作者: 夏明杰,女,硕士生

通信作者: 杨立娜 E-mail: yangln10@lzu.edu.cn

不同酶的分解,提高其分子稳定性^[8-10]。由于多糖自身的黏附性增加了其在 GIT 中的停留时间及肠道渗透率,提高了口服生物利用度和靶向肠道细胞的有效性。为开发营养健康的功能性食品提供了保障^[11-13]。

3 天然多糖基纳米递送载体的类别及其应用

近年来,由于纳米载体系统的独特优势,各种各样的天然多糖基纳米载体被开发用于食品,包括纳米胶束、纳米凝胶、纳米乳液、聚合物纳米颗粒和纳米纤维等(图 1)。表 1 总结了基于多糖封装生物活性分子的不同载体系统及其优缺点。

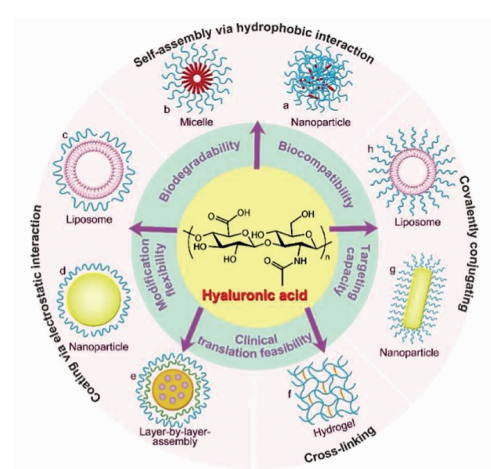


图 1 透明质酸的化学结构及其衍生纳米物的构型示意图^[14]
Fig.1 Chemical structure of hyaluronic acid and configurations for hyaluronic acid derived nanomaterials^[14]

表 1 多糖基纳米材料对功能因子的封装

Table 1 Encapsulation of functional factor by polysaccharide based nanomaterials

类别	特点	包封材料	生物活性化合物	封装目的	制备方法	参考文献	
纳米胶束	优点	生产方法简单,稳定性高,活性化合物的控释	香菇多糖	叶酸	提高稳定性	盐析法	[15]
		壳聚糖	脱氧胆酸	提高抗菌活性	表面修饰法	[16]	
纳米纤维	缺点	对表面活性剂要求高	壳聚糖	菊苣酸	提高生物利用度和抗氧化活性	自组装法	[17]
		菊粉	β -胡萝卜素	提高包封率	表面修饰法	[18]	
		魔芋葡甘露聚糖	绿原酸	提高热稳定性	微流控纺丝法	[19]	
纳米颗粒	优点	机械性能差	支链淀粉	姜黄素	提高稳定性	静电纺丝法	[20]
		壳聚糖	百里酚	缓慢释放	溶液吹丝法	[21]	
		壳聚糖	姜黄素	提高稳定性	静电纺丝法	[22]	
		生物相容性好,价格便宜,化合物的高稳定性	果胶- β -乳球蛋白	维生素 D ₂	提高溶解性	离子交联法	[23]
		果胶-乳清蛋白	花青素	提高稳定性	静电络合法	[24]	
果胶-乳清蛋白	叶酸	提高贮存稳定性	均质法	[25]			
果胶-壳聚糖	姜黄素	提高稳定性和控制释放	离子交联法	[26]			
果胶-乳清蛋白	橙皮油	提高储存稳定性	络合法	[27]			

(续表 1)

类别	特点	包封材料	生物活性化合物	封装目的	制备方法	参考文献		
纳米乳液	缺点	果胶-乳铁蛋白	姜黄素	提高氧化活性	沉淀法	[28]		
		果胶-乳清蛋白	D-柠檬烯	提高分子稳定性	超声均质法	[29]		
		果胶-酪蛋白	丁香酚	提高储存稳定性	相转变温度法	[30]		
		果胶	白藜芦醇	提高稳定性、生物可及性和抗氧化	静电沉淀法	[31]		
		果胶-壳聚糖	花青素	提高分子稳定性, 控制释放	静电自组装法	[32]		
		菊粉-海藻酸盐-壳聚糖	槲皮素	靶向递送	凝胶法	[33]		
		菊粉和低聚果糖	维生素 C	温控释放	喷雾干燥法	[34]		
		麦芽糊精	橄榄苦苷	提高胃肠道稳定性, 提高生物利用率	喷雾干燥法	[35]		
		乙酰化淀粉	没食子酸	提高包封率	喷雾干燥法	[36]		
		桑叶多糖	木犀草素	靶向递送	自组装	[37]		
纳米凝胶	优点	甜菜果胶- β -环糊精	叶黄素	提高稳定性	均质法	[38]		
		果胶-乳清蛋白	藏红花提取物	提高稳定性	喷雾干燥法	[39]		
		阿拉伯树胶	姜黄素	提高抗氧化活性	反溶剂沉淀法	[40]		
		古洛糖醛酸寡糖	白藜芦醇	提高稳定性、抗氧化	自组装法	[41]		
		果胶-牛血清蛋白	维生素 C	提高稳定性和生物利用度	自组装法	[42]		
		果胶	黄酮	提高氧化活性	离子凝胶法	[43]		
		低聚木糖-乳清分离蛋白	番茄红素	提高溶解度和热/贮存稳定性	共轭-接枝法	[44]		
		β -葡聚糖	维生素 B ₁₂	肠道靶向释放	交联法	[45]		
		纳米凝胶	缺点	光敏化学降解				
				可控制胃肠道释放, 防止化学降解				

3.1 多糖纳米胶束

天然多糖纳米胶束是由两亲链组成的自组装纳米结构(图 2), 其一端有疏水区域, 另一端有亲水区域; 疏水性基团构成核心, 而亲水性基团构成外壳, 可以分散在水性介质中^[46]; 粒径范围一般在 20~200 nm^[47]。多糖纳米胶束具有内核装载疏水小分子物质的能力, 独特的壳核结构赋予胶束靶向运输、控制释放、高生物活性、高稳定性等方面的优势^[48]。

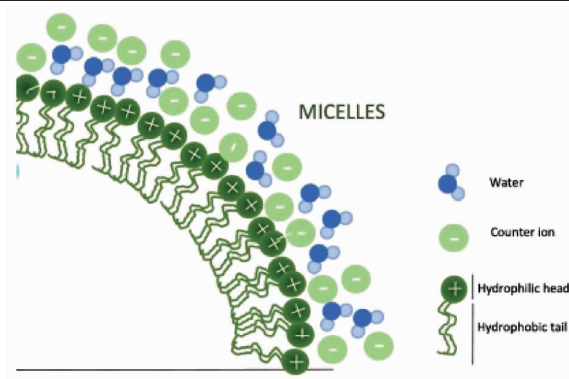


图 2 纳米胶束的结构示意图^[49]

Fig.2 Structure of nanomicelles^[49]

多糖自组装形成胶束并稳定其壳-核结构的分子间作用力可分为共价键作用力和非共价键作用力^[50](表 2)。胶束的形成与稳定以非共价键作用力为主,如疏水作用、氢键、范德华力和静电作用等,而共价键作用力能够使胶束更加稳定。疏水相互作用主要有多糖的疏水链段之间,在水分子的推动下,疏水链段相互聚集而形成胶束的内核,是推动壳-核结构形成并稳定内核结构的主要作用力^[51]。此外,疏水相互作用是一个吸热的过程,在高温环境下更稳定。在多糖胶束形成和稳定过程中,多糖分子链上的羧基(-COOH)、羟基(-OH)、羰基(-CO-)之间以及多糖亲水基团与周围水分子之间存在较强的氢键作用^[52-53]。由于多糖分子中存在大量羟基,因此氢键成为胶束亲水性外壳结构稳定的另外一种主要作用力。然而,鉴于氢键的

形成是放热的过程,高温环境对外壳的稳定具有破坏作用。范德华力主要有多糖分子中的极性基团(如-OH、-COOH)之间、极性基团与非极性基团(如-CH₃)之间以及非极性基团之间,驱使多糖疏水链段向内聚集,而亲水链端面向水溶液^[54]。范德华力虽然强度有限,但对多糖胶束内部结构的完整性的形成非常重要^[55]。静电相互作用仅出现在离子化多糖胶束的稳定过程中。对于单一类型离子化多糖(正电荷或负电荷)形成的自聚集胶束,一方面静电作用使多糖趋于解离而不利于胶束形成,另一方面它可以阻止胶束无限聚集,从而使形成的胶束体系更加稳定^[56]。因此,多糖胶束内核或外壳中的任何共价键相互作用都会显著提升胶束的稳定性^[57]。

表 2 稳定多糖纳米胶束结构的主要分子间作用力

Table 2 Inter-molecular force between structure of polysaccharide nanomicelles

类型	所涉及的官能团	强度/(kJ/mol)	特点	位置
疏水相互作用	羟基	5~50	无选择性,无方向性	核心
氢键	-C=O,-OH,-COOH	5~150	有选择性,有方向性	外壳
范德华力	分子	1~9	无选择性,无方向性	各个部位
静电作用	氨基和羧基	5~100	无选择性	带电基团
共价键	S-S,H-H,C-C	200~1 000	不可逆	外壳、核心

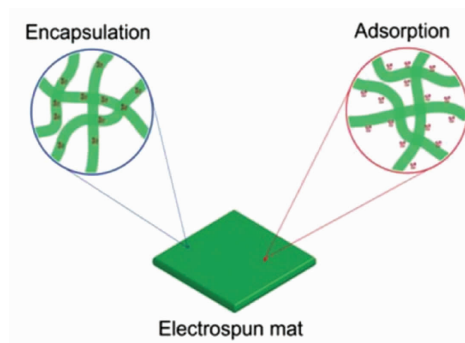
基于特有的壳核结构,多糖纳米胶束在食物活性因子递送、功能性食品开发领域具有巨大潜力。例如,菊苣酸具有抗氧化,抗病毒,提高免疫力等特性,然而其口服生物利用度较低^[58]。王庚南等^[17]将菊苣酸接枝壳聚糖自组装纳米胶束,口服该纳米胶束显著改善了菊苣酸的肠道转运、体内生物利用度和抗氧化活性。槲皮素是从植物中提取的多酚类黄酮,然而其水溶性差,生物利用度低,靶向性低。张树彪等^[59]通过将十二胺接枝到透明质酸上合成了两亲性透明质酸聚合物,进而自组装胶束,槲皮素负载能力达 75.9%。杨子明等^[60]以葡聚糖作为骨架,通过超声自组装封装槲皮素,制备负载槲皮素的纳米胶束,槲皮素的光稳定性和抗氧化活性得到有效提高。

3.2 多糖纳米纤维

多糖纳米纤维直径为 1~100 nm,主要应用静电纺丝技术生产壳聚糖、纤维素、淀粉和支链淀粉

等纳米纤维^[61-63]。纳米纤维的高表面积和孔隙率促使其易与活性化合物结合(图 3),因此,纳米纤维常被用于食品包装和输送功能因子^[22]。

抗氧化剂和酚类化合物可以通过静电纺丝技术加载到纳米纤维中^[65]。姜黄素是一种脂溶性多



注:活性物质可以被包裹在纤维内部(左)或吸附在纤维表面(右)。

图 3 纳米纤维结构示意图^[64]

Fig.3 The structure of nanofibers^[64]

酚,具有显著的抗氧化和抗癌活性^[66]。由于其生物利用度低,因此需要开发递送载体实现控释。利用壳聚糖/磷脂纳米纤维来输送姜黄素,其释放曲线显示姜黄素从纤维中持续释放超过7d(约75%)^[67]。之前也有类似的报道,将姜黄素封装在苜蓿蛋白分离物/支链淀粉纳米纤维中,模拟体外消化在肠道中缓慢释放60h(约80%)^[20]。以葡聚糖、乳清蛋白浓缩物和壳聚糖为基质材料封装番茄红素,可以保护番茄红素免受潮湿和热降解^[68]。绿原酸是制备抗菌食品包装材料的一种天然多酚化合物,很容易氧化,且对热和光敏感。庞杰等^[19]采用微流控纺丝技术制备了魔芋葡甘露聚糖载绿原酸的新型抗菌食品包装材料,该材料表现出较高的热稳定性、防潮性和高机械性能。吴迪等^[21]采用溶液吹丝技术制备了负载百里酚的壳聚糖纳米纤维,百里酚长期连续释放,具有良好的抗真菌活性,可用于水果保鲜和包装。

3.3 多糖纳米颗粒

多糖纳米颗粒尺寸在10 nm至1 μm之间,根据其形态可分为纳米胶囊和纳米球两大类^[69]。纳米胶囊通常将功能因子溶解或分散在用聚合物膜封装的液体核心(油或水)中,而纳米球是则将功能因子包埋在聚合物基质中(图4)。

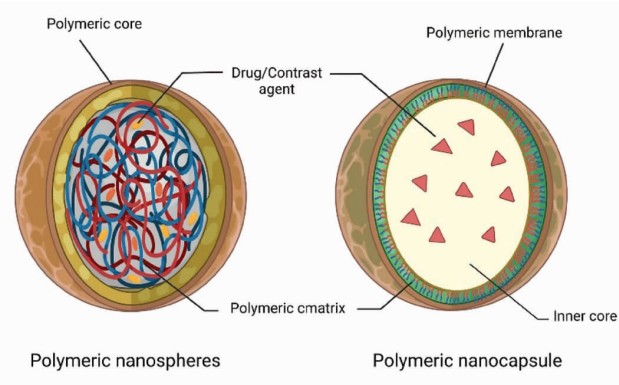


图4 纳米球和纳米胶囊示意图^[70]

Fig.4 The structure of polymeric nanospheres and nanocapsules^[70]

3.3.1 多糖纳米胶囊 纳米胶囊是一种中空囊泡结构,通过生物聚合物膜包裹功能因子以保护核心免受外部环境条件的影响。通常使用凝聚、分散聚合、自组装、盐析、纳米沉淀和超临界流体技术生产纳米胶囊。纳米胶囊可以通过改变其孔隙度

或完全分解其结构来响应环境刺激(如离子强度、pH值或温度),进而释放功能因子^[71]。

孙爱东等^[72]以明胶和羧甲基纤维素钠为原料,通过复合凝聚法开发了纳米胶囊包埋玉米黄素,提高了玉米黄素的热稳定性。并且进行体外胃肠道消化时,玉米黄素在胃期具有缓释作用,而在肠期则表现出更高和更快的释放。钟建等^[73]以单轴电喷雾电离技术得到纳米级球形海藻酸钙胶囊,用于鱼油在小肠中的特异性和持续性释放。张力等^[74]用明胶、壳聚糖作为载体,采用自组装制备丁香酚-明胶-壳聚糖纳米胶囊,使丁香酚缓释,并提高了生物利用度。

3.3.2 多糖纳米球 纳米球是球形聚合物基质,其中水性聚合物分散在有机相中并连接形成球形结构,生物活性成分均匀地分散其中,其尺寸范围为10~200 nm。纳米球可以通过聚合法、溶剂置换技术、溶剂蒸发和相转化温度制备^[70]。由于纳米球体积小,可以逃避吞噬细胞的快速清除,能够穿透组织和细胞间隙,提高递送体系的靶向性和释放特性。

谭晨等^[75]利用壳聚糖和橄榄果胶通过静电自组装的方法构建了纳米球载体,使蓝莓花青素通过静电相互作用嵌入到纳米球载体中,提高了花青素的热稳定性、自由基清除能力和靶向释放性。郑振佳等^[76]以牛蒡多糖为载体制备纳米球,同时装载齐墩果酸和熊果酸,提高其水溶性和生物利用率。此外,该多糖纳米球可以作为食品中疏水性生物活性分子的天然递送系统,用于开发新型功能性食品。

3.4 多糖纳米乳液

多糖纳米乳液是一种由表面活性剂稳定的胶体分散体系,其平均粒径在20~200 nm。与传统乳液相比,纳米乳液的粒径小,界面性能好,具有良好的透明性和动力学稳定性,将功能因子包封在纳米乳液中,有助于改善其理化稳定性和生物学功效^[77]。

根据组分和内外相分布不同,纳米乳液可分为包封亲油性物质的水包油型(O/W)、包封亲水性物质的油包水型(W/O)以及双连续多相纳米乳(O/W/O、W/O/W)^[78]。水包油纳米乳液由分散在水性流体中的小乳化剂包被的脂滴($d < 200$ nm)组

成, 通过疏水性生物活性剂的水相与亲水性乳化剂的水相匀浆形成^[79]。纳米乳液在提高疏水性生物活性物质的生物利用度方面效果显著, 作为一种功能活性成分的载体, 可以提高其溶解性、稳定性和生物利用度。

纳米乳液一般经 2 个步骤完成, 首先是制备大分子乳液, 其次是从大分子乳液到纳米乳液的转化。制备纳米乳液主要分为高能乳化法和低能

乳化法。其中, 高压均质器、超声等高能乳化法提供强大的外力来破坏和混合油、水两相, 产生纳米级、高动能的液滴(图 5a)。低能乳化法, 如相变温度和乳化反转点, 既利用外部能量较小的内在物理化学力来产生液滴^[80-81](图 5b)。因此, 低能乳化法不需复杂和高成本设备, 在能源上高效且相对容易制备^[82]。研究表明, 纳米乳液可以运输高负荷的亲脂性物质并保护它们免受氧化和酶促降解^[83]。

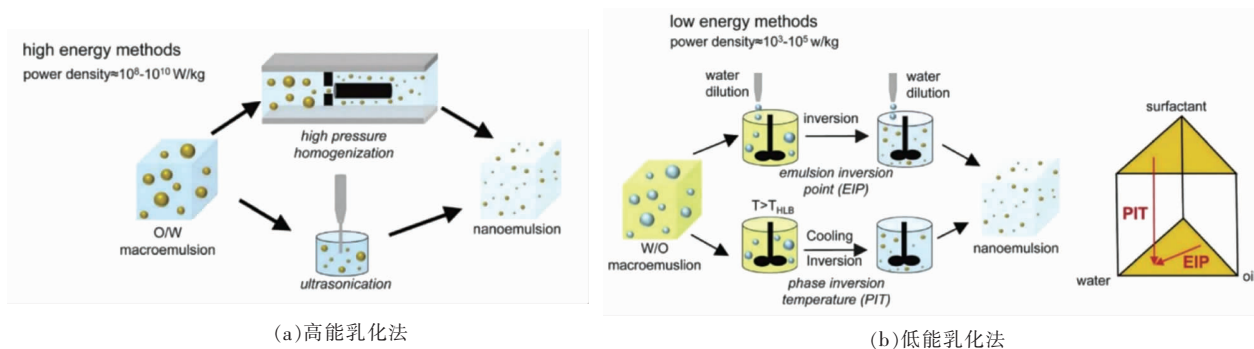


图 5 制备纳米乳液的高能乳化和低能乳化法的示意图^[80]

Fig.5 Schematic representations of high-energy and low-energy methods for preparing nanoemulsions^[80]

多糖纳米乳液在食品或药品活性成分的靶向递送和精准释放中具有广阔应用前景。如陈小强等^[84]从青砖茶中分离出天然抗氧化乳化剂茶多糖偶联物, 制备稳定的纳米乳液($d < 140 \text{ nm}$), 且该纳米乳液表现出优异的抗氧化活性、良好的 pH 耐受性、耐热性和不同温度下的长期贮存性, 具有在酸性胃环境中延缓类胡萝卜素降解的能力, 能够显著提高水包油纳米乳液中 β -胡萝卜素的稳定性和生物可及性。

作为营养输送系统, 纳米乳剂不仅可以提高功能因子的化学稳定性, 还可以提高其生物利用度。续旭等^[41]以古洛糖醛酸寡糖作为稳定剂制备白藜芦醇 O/W 纳米乳液, 与普通 O/W 白藜芦醇纳米乳液相比, 稳定性、缓释效果、清除 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的能力均显著提高。朱巧梅等^[85]以柚皮纳米纤维素为原料制备了用于番茄红素递送的 Pickering 纳米乳液, 提高了番茄红素的稳定性, 并调控胃肠道消化过程中番茄红素的释放。

3.5 多糖纳米水凝胶

多糖纳米水凝胶是由化学或物理交联的亲水性或两亲性聚合物网络构成的纳米级凝胶, 具有

特殊的膨胀能力, 可以保留大量的水在三维网络结构中。纳米水凝胶通常经凝聚、热变性、乳化、注射或挤压、剪切、喷雾冷却等方法制备。多糖基纳米水凝胶通过非共价相互作用(如静电相互作用、疏水相互作用、氢键和空间排阻)或共价相互作用(酶交联、化学交联和美拉德反应)形成, 如图 6 所示。这些方法制备的纳米凝胶, 使用方便, 对环境友好, 成本低廉。

羧甲基魔芋葡甘聚糖-壳聚糖纳米凝胶, 用于益生菌的定向输送, 提高益生菌对消化损伤的耐受性、冻干稳定性和延长体外贮存时间^[87]。熊华

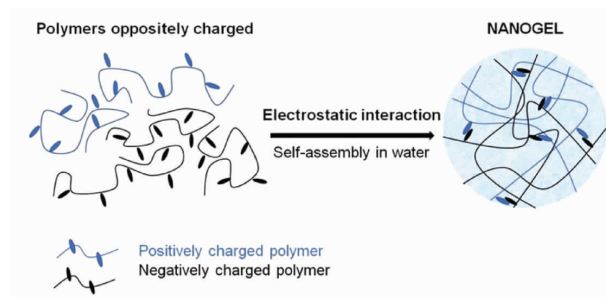


图 6 在水介质中的物理交联纳米凝胶^[86]

Fig.6 Physically crosslinked nanogel in aqueous media^[86]

等^[65]利用柑橘皮中的果胶与牛血清白蛋白制备纳米水凝胶包载抗坏血酸,获得包囊效率为 65.31% 的稳定食品,并且维生素 C 的保留率提高(95.10%)。海藻酸盐和纤维素基水凝胶适用于结肠靶向递送,因水凝胶表面极性可以降低其与胃肠液之间的界面张力^[88]。GIT 不同区域(口腔、胃、小肠和结肠)的环境条件(例如停留时间、液体体积、酶活性、pH 值、离子组成和两亲体水平等)显著影响多糖基水凝胶载体中功能因子的释放过程。图 7 显示了几种潜在的触发机制。多糖纳米水凝胶具有高负载能力、高稳定性和环境(温度、pH 值、酶、还原剂、离子强度等)响应性等优势,已被广泛用于食品行业。

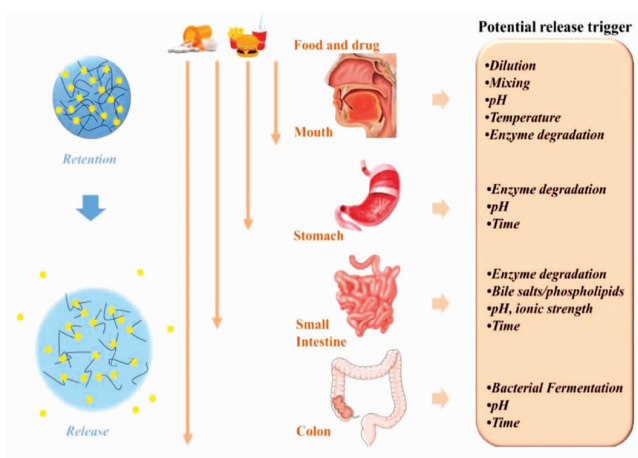


图 7 水凝胶在人体各个部位的潜在触发释放机制^[89]

Fig.7 Potential trigger release mechanisms of hydrogels in various parts of the human body^[89]

4 多糖递送载体在功能食品中的应用与挑战

食品中含有多种营养物质,如茶多酚、姜黄素、番茄红素、植物甾醇和虾青素等,具有改善人体健康的作用^[90]。然而,这些营养物质易受光热影响而降解,其物理、化学稳定性在生产、加工和贮存过程中受到恶劣环境条件的显著影响,在人体内极不稳定。同时,由于消化和吸收过程中体内生理条件的影响,生物活性化合物的有机功能易被改变。目前,人们的生活理念开始趋于健康化,越来越多的人开始重视食物中的活性营养成分,因此,开发功能性食品已经成为食品研究的热点和发展趋势。以天然多糖为材料制备的纳米载体具

有毒性低,生物相容性好,可生物降解等优点。因此,可利用纳米封装技术制造不同的多糖输送系统包封生物活性化合物。

例如 Jangid 等^[91]利用生物偶联法设计了一种基于菊粉-普鲁糖醛-硬脂酸的双折叠纳米胶束(~172 nm 和-18 mV),用于白藜芦醇的 pH 响应递送。静电纺丝是生产纳米纤维的一种简单而廉价的方法。Marziyeh 等^[92]通过静电纺丝制造了负载姜黄素黄耆胶纳米纤维。Zhao 等^[93]利用静电相互作用开发基于海藻酸盐/羧甲基纤维素/纤维素纳米晶的双核益生元纳米胶囊,加载益生菌(乳酸杆菌和枯草芽孢杆菌)用于代谢综合征。Esquerdo 等^[94]使用机械搅拌技术以壳聚糖为原料制备负载必需脂肪酸和鱼油的纳米乳液,包封效率为 74.1%。Peng 等^[95]通过自组装技术利用柑橘皮果胶-牛血清白蛋白设计了负载维生素 C 的纳米水凝胶,维生素 C 的包封效率约为 65.31%,制备的纳米凝胶体系在贮藏 73 周后,稳定性为 95.10%。总之,多糖基纳米载体是一种有前途的生物材料,在提高功能因子的稳定性和生物利用度方面具有巨大潜力。

应用于食品体系的多糖递送载体还需满足若干条件。首先,多糖基纳米载体在 GIT 和恶劣环境中的稳定性。其次,载体能够快速跨越肠黏液层,以便快速到达肠细胞表面而不被黏液清除。载体的粒径大小是影响肠黏液渗透能力的重要因素,较小的载体更容易渗透黏液屏障,在细胞中富集,从而进入体循环。尺寸较小的纳米载体能够以主动内吞的细胞途径进入小肠上皮细胞,显著提高包埋于载体中的活性因子的胞内有效浓度。

多糖递送载体在体内高效吸收还面临很多阻碍,需要克服胃肠道的低 pH 值、离子强度、酶和黏液屏障的阻碍,才能显著提高其肠道吸收率。人体复杂的生理环境会阻碍荷载功能因子的递送载体到达靶位点。因此,需要更加智能、稳定性更高的递送载体保护和递送生物活性物质到达目标部位按需释放。首先,根据肠道中性 pH 值、微生物酶、特异性受体和上皮细胞的黏液屏障的微环境,可以设计环境响应性释放载体,使生物活性分子适时适地释放到小肠。当较多的生物活性物质被递送至小肠后,小肠上皮细胞会以主动内吞的方

式进一步对功能因子进行吸收和利用。未来应深入研究载体与黏液相互作用、载体细胞摄取机制、靶向递送机制和载体代谢安全性及对肠道菌群的影响等。采用多糖壁材来构建肠道响应性释放载体,来递送高活性益生菌,具有广阔的应用前景。这些研究将为开发营养健康的功能性食品、特殊医学食品、特殊人群和特殊用途食品和有一定的疾病预防和促进机体健康的营养食品提供理论依据和技术支撑。

5 总结与展望

纳米封装使营养物质和其它生物化合物的受控/靶向释放成为可能,因此,绿色纳米技术在食品工业上的应用是未来的发展趋势。天然多糖具有生物可降解性和良好的生物相容性,被广泛应用于活性物质运载体系。本文综述了纳米技术的起源和多糖基纳米载体的优点,以及不同类型的多糖基纳米载体的制备方法、形成机理、结构特征以及有效包封生物活性化合物并在靶向部位的释放效率。特别强调了多糖基纳米载体在功能性食品研究领域具有广阔的应用前景。随着人们日益重视慢性病的预防,多糖纳米封装为增强食品衍生生物活性化合物的稳定性、功能性和生物利用度提供了新的思路。尽管越来越多的证据表明天然多糖的无毒、低成本、环保和生物相容性,适用于开发高效纳米载体用于功能性食品。在一些国家,只有少数被批准为食品开发的材料。天然多糖基纳米载体应用于功能性食品开发中,还需要通过体外和体内实验进一步研究,及其对食品感官和理化性质的影响和潜在的工业化应用。目前对于多糖基纳米载体应用于食品的立法仍处于初步发展阶段,未来还需解决应用、风险和食品安全等方面的问题。为更有效地使用和有针对性地输送食品生物活性物质铺平道路,这将促进功能性食品和营养保健品的发展,为精准营养和医学的相关领域提供前所未有的机遇。

参 考 文 献

- [1] 栗焕焕,刘亚男,王萌,等.基于多糖的超分子组装前后体内外生物活性变化研究概况[J].天津中医药大学学报,2021,40(5):674-680.
- [2] LI H H, LIU Y N, WANG M, et al. Overview on *in vitro* and *in vivo* biological activity changes before and after polysaccharide-based supramolecular assembly[J]. Journal of Tianjin University of Traditional Chinese Medicine, 2021, 40(5): 674-680.
- [3] DIMA C, ASSADPOUR E, DIMA S, et al. Nutraceutical nanodelivery; an insight into the bioaccessibility/bioavailability of different bioactive compounds loaded within nanocarriers[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(18): 3031-3065.
- [4] LUO Y C, WANG Q, ZHANG Y Q. Biopolymer-based nanotechnology approaches to deliver bioactive compounds for food applications: A perspective on the past, present, and future[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(46): 12993-13000.
- [5] 张文林.基于柑橘皮渣及果胶的新型微纳米材料研制及其应用研究[D].重庆:西南大学,2017.
- [6] ZHANG W L. Development and application of new micro nano materials based on citrus peel residue and pectin[D]. Chongqing: Southwest University, 2017.
- [7] 蒋心驰,阮桂鑫,高建青.基于多糖聚合物的非病毒基因载体的研究进展[J].中国现代应用药学,2015,32(2):8.
- [8] JIANG X C, RUAN G X, GAO J Q. Advances in polysaccharide polymer-based non-viral vehicle[J]. Chinese Journal of Modern Applied Pharmacy, 2015, 32(2): 8.
- [9] ALHODIEB F S, BARKAT M A, BARKAT H A, et al. Chitosan-modified nanocarriers as carriers for anticancer drug delivery: Promises and hurdles[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 217: 457-469.
- [10] PETROS R, DESIMONE J. Strategies in the design of nanoparticles for therapeutic applications[J]. Nature Reviews Drug Discovery, 2010, 9: 615-627.
- [11] SHI Y A, LIU L Z, YIN M M, et al. Mucus- and pH-mediated controlled release of core-shell chitosan nanoparticles in the gastrointestinal tract for diabetes treatment[J]. Journal of Drug Targeting, 2023, 31(1): 65-73.
- [12] GEORGE A, SHAH P A, SHRIVASTAV P S. Natural biodegradable polymers based nano-formulations for drug delivery: A review[J]. International Journal

- of Pharmaceutics, 2019, 561: 244–264.
- [10] AFZAL O, RIZWANULLAH M, ALTAMIMI A S A, et al. Harnessing natural polysaccharides –based nanoparticles for oral delivery of phytochemicals: Knocking down the barriers[J]. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 2023, 82: 104368.
- [11] TAIPALEENMÄKI E, STÄDLER B. Recent advancements in using polymers for intestinal mucoadhesion and mucopenetration[J]. Macromolecular Bioscience, 2020, 20(3): 1900342.
- [12] SURENDRANATH M, M R R, PARAMESWARAN R. Recent advances in functionally modified polymers for mucoadhesive drug delivery[J]. Journal of Materials Chemistry B, 2022, 10(31): 5913–5924.
- [13] MENEGUIN A B, SILVESTRE A L P, SPOSITO L, et al. The role of polysaccharides from natural resources to design oral insulin micro- and nanoparticles intended for the treatment of diabetes mellitus: A review [J]. Carbohydrate Polymers, 2021, 256: 117504.
- [14] HOU X Y, ZHONG D, CHEN H Y, et al. Recent advances in hyaluronic acid –based nanomedicines: Preparation and application in cancer therapy [J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 292: 119662.
- [15] YANG Y, SONG Z F, QI W G, et al. Preparation and properties of tumor –targeting lentinan –oleic acid polymer micelles based on folic acid for adriamycin delivery[J]. Reactive and Functional Polymers, 2023, 192: 105717.
- [16] WANG M Z, SONG Z M, WEN Y, et al. Effect of deoxycholic acid –modified MPEG –oligo –chitosan micelles on the delivery, anti –biofilm activity and ROS induction of ketoconazole against *C. albicans* [J]. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 2023, 87: 104884.
- [17] REN J, REN X, LI Y P, et al. Dihydrocaffeic acid grafted chitosan self –assembled nanomicelles with enhanced intestinal transport and antioxidant properties of chicoric acid[J]. Food Chemistry, 2023, 427: 136707.
- [18] KOKUBUN S, RATCLIFFE I, WILLIAMS P A. The interfacial, emulsification and encapsulation properties of hydrophobically modified inulin[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 194: 18–23.
- [19] LIN W M, NI Y S, PANG J. Microfluidic spinning of poly (methyl methacrylate)/konjac glucomannan active food packaging films based on hydrophilic/hydrophobic strategy[J]. Carbohydrate Polymers, 2019, 222: 114986.
- [20] BLANCO –PADILLA A, LÓPEZ –RUBIO A, LOARCA –PIÑA G, et al. Characterization, release and antioxidant activity of curcumin –loaded amaranth –pullulan electrospun fibers[J]. LWT – Food Science and Technology, 2015, 63(2): 1137–1144.
- [21] SHEN C Y, WU M L, SUN C, et al. Chitosan/PCL nanofibrous films developed by SBS to encapsulate thymol/HP β CD inclusion complexes for fruit packaging[J]. Carbohydrate Polymers, 2022, 286: 119267.
- [22] WEN P, ZONG M H, LINHARDT R J, et al. Electrospinning: A novel nano –encapsulation approach for bioactive compounds[J]. Trends in Food Science & Technology, 2017, 70: 56–68.
- [23] RON N, ZIMET P, BARGARUM J, et al. Beta –lactoglobulin – polysaccharide complexes as nanovehicles for hydrophobic nutraceuticals in non –fat foods and clear beverages[J]. International Dairy Journal, 2010, 20(10): 686–693.
- [24] ARROYO –MAYA I J, MCCLEMENTS D J. Biopolymer nanoparticles as potential delivery systems for anthocyanins: Fabrication and properties[J]. Food Research International, 2015, 69: 1–8.
- [25] ASSADPOUR E, MAGHSOUDLOU Y, JAFARI S M, et al. Optimization of folic acid nano –emulsification and encapsulation by maltodextrin –whey protein double emulsions[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2016, 86: 197–207.
- [26] ALKHADER E, BILLA N, ROBERTS C J. Mucoadhesive chitosan –pectinate nanoparticles for the delivery of curcumin to the colon[J]. AAPS PharmSciTech, 2017, 18(4): 1009–1018.
- [27] GHASEMI S, JAFARI S M, ASSADPOUR E, et al. Production of pectin –whey protein nano –complexes as carriers of orange peel oil[J]. Carbohydrate Polymers, 2017, 177: 369–377.
- [28] YAN J K, QIU W Y, WANG Y Y, et al. Biocompatible polyelectrolyte complex nanoparticles from lactoferrin and pectin as potential vehicles for antioxidative curcumin[J]. J Agric Food Chem, 2017, 65(28): 5720–5730.
- [29] GHASEMI S, JAFARI S M, ASSADPOUR E, et al. Nanoencapsulation of d –limonene within nanocarriers

- produced by pectin-whey protein complexes[J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 77: 152-62.
- [30] VENERANDA M, HU Q B, WANG T R, et al. Formation and characterization of zein-caseinate-pectin complex nanoparticles for encapsulation of eugenol[J]. *LWT*, 2018, 89: 596-603.
- [31] HUANG X L, LIU Y, ZOU Y, et al. Encapsulation of resveratrol in zein/pectin core-shell nanoparticles: Stability, bioaccessibility, and antioxidant capacity after simulated gastrointestinal digestion[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 93: 261-269.
- [32] ZHAO X, ZHANG X D, TIE S S, et al. Facile synthesis of nano-nanocarriers from chitosan and pectin with improved stability and biocompatibility for anthocyanins delivery: An *in vitro* and *in vivo* study[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 109: 106114.
- [33] LIU S Y, FANG Z X, NG K. Incorporating inulin and chitosan in alginate-based microspheres for targeted delivery and release of quercetin to colon[J]. *Food Research International*, 2022, 160: 111749.
- [34] DE ABREU FIGUEIREDO J, ANDRADE TEIXEIRA M, HENRIQUE CAMPELO P, et al. Encapsulation of camu-camu extracts using prebiotic biopolymers: Controlled release of bioactive compounds and effect on their physicochemical and thermal properties[J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109563.
- [35] GONZÁLEZ E, GÓMEZ-CARAVACA A M, GIMÉNEZ B, et al. Role of maltodextrin and inulin as encapsulating agents on the protection of oleuropein during *in vitro* gastrointestinal digestion[J]. *Food Chem*, 2020, 310: 125976.
- [36] ROBERT P, GARCÍA P, REYES N, et al. Acetylated starch and inulin as encapsulating agents of gallic acid and their release behaviour in a hydrophilic system[J]. *Food Chemistry*, 2012, 134(1): 1-8.
- [37] LI R L, ZHOU J N, ZHANG X Y, et al. Construction of the Gal-NH₂/mulberry leaf polysaccharides-lysozyme/luteolin nanoparticles and the amelioration effects on lipid accumulation[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2023, 253: 126780.
- [38] LIU Z B, LI Y B, GENG S, et al. Fabrication of food-grade Pickering high internal phase emulsions stabilized by the mixture of β -cyclodextrin and sugar beet pectin[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, 182: 252-263.
- [39] ESFANJANI A F, JAFARI S M, ASSADPOOR E, et al. Nano-encapsulation of saffron extract through double-layered multiple emulsions of pectin and whey protein concentrate[J]. *Journal of Food Engineering*, 2015, 165: 149-155.
- [40] ZHOU D Y, XIN Y L, WU B G, et al. Pickering emulsions stabilized by ternary complexes involving curcumin-modified zein and polysaccharides with different charge amounts for encapsulating β -carotene[J]. *Food Chemistry*, 2024, 433: 137338.
- [41] BI D C, LI M T, ZHU N T, et al. Unsaturated guluronate oligosaccharide used as a stabilizer of oil-in-water nanoemulsions loaded with bioactive nutrients[J]. *Food Chemistry: X*, 2022, 16: 100469.
- [42] PENG H L, CHEN S, LUO M, et al. Preparation and self-assembly mechanism of bovine serum albumin-citrus peel pectin conjugated hydrogel: A potential delivery system for vitamin C[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(39): 7377-7384.
- [43] HU Y, ZHANG W L, KE Z L, et al. *In vitro* release and antioxidant activity of Satsuma mandarin (*Citrus reticulata* Blanco cv. unshiu) peel flavonoids encapsulated by pectin nanoparticles[J]. *International Journal of Food Science & Technology*, 2017, 52(11): 2362-2373.
- [44] JIA C S, CAO D S, JI S P, et al. Whey protein isolate conjugated with xylo-oligosaccharides via maillard reaction: Characterization, antioxidant capacity, and application for lycopene microencapsulation[J]. *LWT*, 2020, 118: 108837.
- [45] ZHU K, CHEN X Y, YU D, et al. Preparation and characterisation of a novel hydrogel based on *Auricularia polytricha* β -glucan and its bio-release property for vitamin B₁₂ delivery[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2018, 98(7): 2617-2623.
- [46] ZHANG W J, TAHERI-LEDARI R, GANJALI F, et al. Nanoscale bioconjugates: A review of the structural attributes of drug-loaded nanocarrier conjugates for selective cancer therapy[J]. *Heliyon*, 2022, 8(6): e09577.
- [47] 王慧. 离子交联的生物素- β -环糊精-海藻酸钠抗肿瘤药物靶向纳米载体的研究[D]. 安徽: 安徽师范大学

- 学, 2019.
- WANG H. Study on ion crosslinked biotin- β -cyclodextrin sodium alginate antitumor drug targeting nanocarriers [D]. Anhui: Anhui Normal University, 2019.
- [48] 肖丽, 叶发银, 赵国华. 两亲性多糖的制备及其自聚集胶束的特性研究进展[J]. 食品科学, 2017, 38(1): 6.
- XIAO L, YE F Y, ZHAO G H. Advances in synthesis of amphiphilic polysaccharides and properties of their self-aggregated micelles[J]. Food Science, 2017, 38(1): 6.
- [49] DIOGO P, AMPARO F, FAUSTINO M, PALMA P J, et al. May carriers at nanoscale improve the Endodontic's future? [J]. Advanced Drug Delivery Reviews, 2023, 195: 114731.
- [50] DING J X, CHEN L H, XIAO C S, et al. Noncovalent interaction-assisted polymeric micelles for controlled drug delivery[J]. Chemical Communications (Cambridge, England), 2014, 50(77): 11274-11290.
- [51] LIU Q Y, YANG X L, XU H B, et al. Novel nanomicelles originating from hydroxyethyl starch-g-poly lactide and their release behavior of docetaxel modulated by the PLA chain length[J]. European Polymer Journal, 2013, 49(11): 3522-3529.
- [52] PANG X, LU Z, DU H L, et al. Hyaluronic acid-quercetin conjugate micelles: Synthesis, characterization, *in vitro* and *in vivo* evaluation[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2014, 123: 778-786.
- [53] GONÇALVES C, GAMA F M. Characterization of the self-assembly process of hydrophobically modified dextrin[J]. European Polymer Journal, 2008, 44(11): 3529-3534.
- [54] ZHU J, LI L, CHEN L, et al. Nano-structure of octenyl succinic anhydride modified starch micelle [J]. Food Hydrocolloids, 2013, 32(1): 1-8.
- [55] HARPAZ Y, GERSTEIN M, CHOTHIA C. Volume changes on protein folding[J]. Structure, 1994, 2(7): 641-649.
- [56] LI W J, PENG H L, NING F J, et al. Amphiphilic chitosan derivative-based core-shell micelles: Synthesis, characterisation and properties for sustained release of Vitamin D₃[J]. Food Chemistry, 2014, 152: 307-315.
- [57] ROLLAND A P, O'MULLANE J E, GODDARD P, et al. New macromolecular carriers for drugs. I. Preparation and characterization of poly(oxyethylene - b - isoprene - b - oxyethylene) block copolymer aggregates[J]. Journal of Applied Polymer Science, 1992, 44: 1195-1203.
- [58] WANG G N, LI Y P, YUAN S K, et al. The intestinal absorption mechanism of chicoric acid and its bioavailability improvement with chitosan[J]. Heliyon, 2022, 8(7): e09955.
- [59] SUN J, LI M, LIN K X, et al. Delivery of quercetin for breast cancer and targeting potentiation via hyaluronic nano-micelles[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 242: 124736.
- [60] HE Z Y, LIU Y H, WANG H, et al. Dual-grafted dextran based nanomicelles: Higher antioxidant, anti-inflammatory and cellular uptake efficiency for quercetin[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 224: 1361-1372.
- [61] MENG Y X, QIU C, LI X J, et al. Polysaccharide-based nano-delivery systems for encapsulation, delivery, and pH-responsive release of bioactive ingredients[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2022, 64(1): 187-201.
- [62] HABIBI MOHRAZ M, GOLBABAIE F, YU I J, et al. Preparation and optimization of multifunctional electrospun polyurethane/chitosan nanofibers for air pollution control applications[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2018, 16: 681-694.
- [63] DROSOU C, KROKIDA M, BILIADERIS C G. Composite pullulan-whey protein nanofibers made by electrospinning: Impact of process parameters on fiber morphology and physical properties[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 77: 726-735.
- [64] TRAN D N, BALKUS K J. Enzyme immobilization via electrospinning[J]. Topics in Catalysis, 2012, 55(16): 1057-1069.
- [65] AWUCHI C G, MORYA S, DENDEGH T A, et al. Nanoencapsulation of food bioactive constituents and its associated processes: A revisit[J]. Bioresource Technology Reports, 2022, 19: 101088.
- [66] SUN X Z, WILLIAMS G R, HOU X X, et al. Electrospun curcumin-loaded fibers with potential biomedical applications[J]. Carbohydrate Polymers, 2013, 94(1): 147-153.
- [67] MENDES A C, GORZELANNY C, HALTER N, et al. Hybrid electrospun chitosan-phospholipids

- nanofibers for transdermal drug delivery[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2016, 510(1): 48–56.
- [68] PEREZ-MASIA R, LAGARON J M, LÓPEZ-RUBIO A. Morphology and stability of edible lycopene-containing micro- and nanocapsules produced through electrospraying and spray drying[J]. Food and Bioprocess Technology, 2014, 8: 459–470.
- [69] SULTANA A, ZARE M, THOMAS V, et al. Nano-based drug delivery systems: Conventional drug delivery routes, recent developments and future prospects[J]. Medicine in Drug Discovery, 2022, 15: 100134.
- [70] HOSSEINI S M, MOHAMMADNEJAD J, SALAMAT S, et al. Theranostic polymeric nanoparticles as a new approach in cancer therapy and diagnosis: A review[J]. Materials Today Chemistry, 2023, 29: 101400.
- [71] GONÇALVES R F S, MADALENA D A, FERNANDES J M, et al. Application of nanostructured delivery systems in food: From incorporation to detection and characterization[J]. Trends in Food Science & Technology, 2022, 129: 111–125.
- [72] ZHANG J Y, JIA G L, ZHAO W B, et al. Nanoencapsulation of zeaxanthin extracted from *Lycium barbarum* L. by complex coacervation with gelatin and CMC[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 112: 106280.
- [73] TAO L N, WANG P P, ZHANG T, et al. Preparation of multicore millimeter-sized spherical alginate capsules to specifically and sustainedly release fish oil[J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(2): 397–406.
- [74] 张力, 张娟, 马凌艳, 等. 自组合法制备丁香酚纳米胶囊及其性能表征[J]. 食品科学, 2018, 39(8): 7.
- ZHANG L, ZHANG J, MA L Y, et al. Preparation and characterization of eugenol nanocapsules by self-assembly method[J]. Food Science, 2018, 39(8): 7.
- [75] XIE C J, HUANG M G, YING R F, et al. Olive pectin-chitosan nanocomplexes for improving stability and bioavailability of blueberry anthocyanins[J]. Food Chemistry, 2023, 417: 135798.
- [76] ZHU S S, QIU Z C, QIAO X G, et al. Creating burdock polysaccharide-oleanolic acid-ursolic acid nanoparticles to deliver enhanced anti-inflammatory effects: Fabrication, structural characterization and property evaluation[J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(2): 454–466.
- [77] 王琨, 张新雪, 殷丽君. 基于改性果胶的纳米乳液包埋生物活性物质研究进展[J]. 中国食品学报, 2022, 22(4): 430–440.
- WANG K, ZHANG X X, YIN L J. Research progress on encapsulation of bioactive substances in nanoemulsions based on modified pectin[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(4): 430–440.
- [78] 冯思敏, 王丽玲, 廖杰, 等. 花青素纳米载体的研究进展[J]. 食品工业科技, 2021, 42(4): 330–336.
- FENG S M, WANG L L, LIAO J, et al. Progress on Anthocyanidin Nano-carriers[J]. Science and Technology of Food Industry, 2021, 42(4): 330–336.
- [79] SANI M A, TAVASSOLI M, AZIZI-LALABADI M, et al. Nano-enabled plant-based colloidal delivery systems for bioactive agents in foods: Design, formulation, and application[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2022, 305: 102709.
- [80] GUPTA A, ERAL H B, HATTON T A, et al. Nanoemulsions: Formation, properties and applications[J]. Soft Matter, 2016, 12(11): 2826–2841.
- [81] DE ALCANTARA LEMOS J, OLIVEIRA A E M F M, ARAUJO R S, et al. Recent progress in micro and nano-encapsulation of bioactive derivatives of the *Brazilian genus Pterodon*[J]. Biomedicine & Pharmacotherapy, 2021, 143: 112137.
- [82] KUMAR M, BISHNOI R S, SHUKLA A K, et al. Techniques for formulation of nanoemulsion drug delivery system: A review[J]. Preventive Nutrition and Food Science, 2019, 24(3): 225–234.
- [83] RAI V K, MISHRA N, YADAV K S, et al. 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: 203–225.
- [84] LI Q A, SHI J L, DU X L, et al. Polysaccharide conjugates from Chin brick tea (*Camellia sinensis*) improve the physicochemical stability and bioaccessibility of β -carotene in oil-in-water nanoemulsions[J]. Food Chemistry, 2021, 357: 129714.
- [85] GAO J B, QIU Y H, CHEN F, et al. Pomelo peel derived nanocellulose as Pickering stabilizers: Fabri-

- cation of Pickering emulsions and their potential as sustained-release delivery systems for lycopene [J]. *Food Chemistry*, 2023, 415: 135742.
- [86] SILVA M P, FABI J P. Food biopolymers-derived nanogels for encapsulation and delivery of biologically active compounds: A perspective review [J]. *Food Hydrocolloids for Health*, 2022, 2: 100079.
- [87] DING X Q, XU Y B, WANG Y Y, et al. Carboxymethyl konjac glucomannan-chitosan complex nanogels stabilized double emulsions incorporated into alginate hydrogel beads for the encapsulation, protection and delivery of probiotics[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2022, 289: 119438.
- [88] YANG Z Y, MCCLEMENTS D J, LI C C, et al. Targeted delivery of hydrogels in human gastrointestinal tract: A review[J]. *Food Hydrocolloids*, 2023, 134: 108013.
- [89] ZHANG S F, ERMANN J, SUCCI M D, et al. An inflammation-targeting hydrogel for local drug delivery in inflammatory bowel disease[J]. *Science Translational Medicine*, 2015, 7(300): 300ra128.
- [90] 沈冬艳. 负载姜黄素改性壳聚糖-酪蛋白酸钠复合纳米粒子的制备及其体外功能评价[D]. 南京: 南京财经大学, 2022.
- SHEN D Y. Preparation and *in vitro* functional evaluation of curcumin loaded chitosan sodium caseinate composite nanoparticles[D]. Nanjing: Nanjing University of Finance and Economics, 2022.
- [91] JANGID A K, PATEL K, JAIN P, et al. Inulin-pluronic-stearic acid based double folded nanomicelles for pH-responsive delivery of resveratrol[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2020, 247: 116730.
- [92] RANJBAR-MOHAMMADI M, BAHRAMI S H. Electrospun curcumin loaded poly (ϵ -caprolactone)/ gum tragacanth nanofibers for biomedical application [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2016, 84: 448-456.
- [93] ZHAO C, ZHU Y J, KONG B, et al. Dual-core prebiotic microcapsule encapsulating probiotics for metabolic syndrome[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(38): 42586-42594.
- [94] ESQUERDO V M, DOTTO G L, PINTO L A A. Preparation of nanoemulsions containing unsaturated fatty acid concentrate-chitosan capsules[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2015, 445: 137-142.
- [95] PENG H L, CHEN S, LUO M, et al. Preparation and self-assembly mechanism of bovine serum albumin-citrus peel pectin conjugated hydrogel: A potential delivery system for vitamin C[J]. *J Agric Food Chem*, 2016, 64(39): 7377-7384.

The Application of Natural Polysaccharide-Based Nano-Delivery Carriers in Functional Foods

XIA Mingjie, YANG Lina*, YU Kejin, WANG Shengnan, HE Yutang, LIU He

(College of Food Science and Engineering, Bohai University, Grain and Cereal Food Bio-efficient Transformation Engineering Research Center of Liaoning Province, Jinzhou 121013, Liaoning)

Abstract Natural polysaccharides have shown the advantages of low cost, wide application, high biocompatibility and degradability. They can be used as nano delivery carriers of functional factors to improve the bioavailability and physicochemical stability of functional factors. In order to provide reference for the efficient preparation of polysaccharide based nanocarriers with biological functions. The origin of nanotechnology and the advantages of polysaccharide based nanocarriers were summarized, as well as the preparation methods, formation mechanism, structural characteristics, encapsulation efficiency, release rate of different types of polysaccharide based nanocarriers. The potential problems and application prospects of polysaccharide based nanocarriers were discussed in functional food research.

Keywords natural polysaccharides; nano delivery carrier; functional food