

# 蛋白基植物多酚纳米输送载体研究进展

## Research progress of protein-based plant polyphenol nano-delivery carriers

陈杨玲<sup>1</sup> 焦 叶<sup>1</sup> 崔 波<sup>2</sup> 方 芳<sup>1</sup>

CHEN Yang-ling<sup>1</sup> JIAO Ye<sup>1</sup> CUI Bo<sup>2</sup> FANG Fang<sup>1</sup>

杨进洁<sup>3</sup> 程云辉<sup>1,2</sup>

YANG Jing-jie<sup>3</sup> CHENG Yun-hui<sup>1,2</sup>

(1. 长沙理工大学食品与生物工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 齐鲁工业大学食品科学与工程  
学院, 山东 济南 250353; 3. 烟台双塔食品股份有限公司, 山东 烟台 265404)

(1. School of Food Science and Bioengineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. School of Food Science and Engineering, Qilu University of Technology, Jinan, Shandong 250353, China; 3. Yantai Shuangta Food Co., Ltd., Yantai, Shandong 265404, China)

**摘要:**研究综述了近年来国内外有关纳米输送体系的制备方法、可用于构建植物多酚纳米输送载体的蛋白质种类,以及交联剂对纳米输送载体修饰等方面的研究进展,并对蛋白基植物多酚纳米输送载体在食品领域中的发展方向进行了展望。

**关键词:**植物多酚;蛋白质;纳米输送体系;交联剂

**Abstract:** This review summarized the research progress on the preparation methods of nano-delivery systems, the types of proteins used to construct plant polyphenol nano-delivery carriers, and the modification of nano-delivery carriers by cross-linking agents domestically and internationally. The development of protein-based plant polyphenol nano-delivery carriers in the food field was also prospected.

**Keywords:** plant polyphenol; protein; nano-delivery system; crosslinker

植物多酚是一类广泛存在于植物中的含有多个酚羟基的化合物,常见于蔬菜、水果、谷物、药草和香料中,以苯酚为骨架,以苯环的多羟基取代为特征,按结构可分为类黄酮、芪类、酚酸和木酚素<sup>[1]</sup>(见图 1)。植物多酚具有抗炎、抑菌、抗衰老和抗癌等功能,是天然色素的重要组成部分和抗氧化剂的主要来源,被广泛应用于食品和医药行业<sup>[2]</sup>。

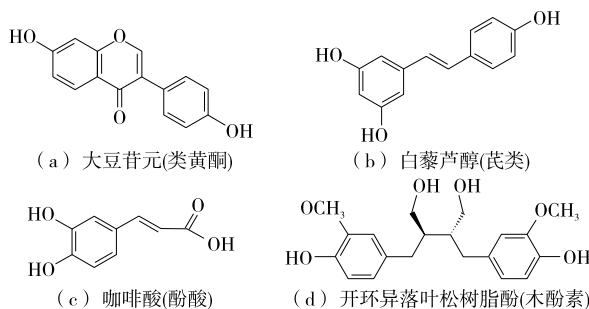


图 1 植物多酚化合物类型

Figure 1 Examples of plant polyphenol compounds

许多植物多酚如姜黄素、白藜芦醇和黄酮类化合物等皆存在溶解度低的问题,因此加工性能不佳,也影响其在人体内的吸收。部分多酚如表没食子儿茶素没食子酸酯,虽然溶解度高,但细胞膜通透性差,极大地限制了其在肠道中的吸收,其生物利用度也低。此外,某些植物多酚在碱性、光、热等条件下不稳定,易受外界环境因素影响而发生降解。植物多酚体内低效输送和低生物利用度极大地限制了其在功能性食品和药物中的应用<sup>[3]</sup>。

20 世纪末出现的纳米输送体系(nanodelivery)为植物多酚在生物体内的输送及其在环境中的有效保护提供了新的思路。纳米输送体系是通过将载体和植物多酚复合物体系减小到纳米范围来提高其表面积与体积比,从而有效提高植物多酚的生物利用度,并改善其溶解度和稳定性<sup>[4]</sup>。因蛋白质具有生物降解性、生物相容性和可再生性,且其结构上具有丰富的官能团和疏水结合位点,易与生物活性物质特别是疏水性生物活性物质结合,而基于蛋白质的纳米载体技术被认为是输送难溶性生物活

**基金项目:**国家自然科学基金(编号:31771901)

**作者简介:**陈杨玲,女,长沙理工大学在读硕士研究生。

**通信作者:**程云辉(1964—),女,长沙理工大学教授,博士。

E-mail: cyh@csust.edu.cn

**收稿日期:**2022-02-08

性物质的最有前途和最有效的技术之一<sup>[5]</sup>,因而被广泛应用于植物多酚等生物活性物质的包埋<sup>[6]</sup>。

研究拟系统梳理近年来国内外有关纳米输送体系的制备方法,动物蛋白、植物蛋白以及蛋白酶解物在构建蛋白基植物多酚纳米输送体系中的应用,以及交联剂对蛋白基纳米输送载体包封率与稳定性提升的研究进展,以期为扩大植物多酚在食品和药品领域的应用提供理论参考。

## 1 纳米输送体系构建方法研究进展

纳米输送体系是指采用物理或化学方法制备、平均粒径为1~1 000 nm的药物或功能因子输送体系<sup>[3]</sup>。纳米输送载体可以保护生物活性物质免受不适当环境的影响,提高其在酸、碱、光、热等条件下的稳定性。此外,纳米输送体系还能提高难溶性化合物在水中的溶解度,控制生物活性物质在胃肠道的释放,增加人体对营养物质的吸收,提高生物活性物质的生物利用度<sup>[7]</sup>。纳米输送体系的构建方法主要分为由上而下(Top-Down)和由下而上(Bottom-Up)两种方式。

### 1.1 由上而下的构建方法

由上而下的构建方法是指运用机械手段(如均质、研磨等),利用高速剪切器、高压均质机、胶体磨、微射流和超声等设备,将尺寸较大的颗粒或液滴破碎成小颗粒或小液滴,以降低颗粒或液滴的尺寸。该方法制备效率高,同时成本也比较高,但产生的液滴尺寸范围较广,所制备的纳米粒子稳定性较差,存在容易重新结晶形成不溶性大颗粒的问题。由上而下构建法常被应用于纳米乳液的制备中。

**1.1.1 微流化** 微流化是使用非常高的压力迫使液体通过由特殊配置的微通道组成的相互作用室。液体通过微通道后进入碰撞室,形成细小的纳米级液滴。Zhang等<sup>[8]</sup>将姜黄素和豌豆蛋白混合,通过微流化器制备豌豆蛋白-姜黄素纳米粒子,其粒径为357 nm。Luo等<sup>[9]</sup>利用双通道微流化制备乳清蛋白- $\beta$ 胡萝卜素纳米乳液,随着压力增大至131 MPa,粒径减少至136 nm,且纳米乳液在4,25,55 °C下贮藏14 d,粒径未发生显著变化。

**1.1.2 高压均质** 高压均质是指当液体快速通过具有特殊内部结构的空腔时,受到高速剪切、高频振荡、空化效应和对流冲击等机械力的作用,在这些机械力的作用下,大液滴会被破碎成小液滴的过程。Zhou等<sup>[10]</sup>利用高压均质化将大豆分离蛋白纳米乳液的粒径降低到165 nm。Jin等<sup>[11]</sup>采用高压均质处理制备大豆蛋白水解物-葡聚糖-阿魏酸三元纳米复合物,其粒径为130 nm。高压均质处理后的纳米粒子,变性温度升高,而DPPH自由基清除能力比未处理的高约11%,表明高压均质处理提高了纳米粒子的热稳定性和抗氧化性。

**1.1.3 超声** 超声可以分解颗粒和聚合物结构的聚集体,将尺寸减小到纳米级,空化气泡破裂产生的力可以将大液滴分解成较小的液滴。Zhang等<sup>[12]</sup>使用超声法制备藜麦蛋白纳米粒子,超声密度增加至10 kJ/mL时,粒径减小至132 nm且呈球形结构。同时,也有研究<sup>[13]</sup>将超声应用至水稻肽纳米粒子的制备,其粒径通过超声处理减小至357.8 nm。超声处理后的纳米粒子的抗氧化性比未超声前的高,其DPPH自由基清除能力增加3.5倍,亚铁离子螯合活性增加3.8倍。

### 1.2 由下而上的构建方法

由下而上法是利用物理或化学方法将材料从分子尺度组装到纳米甚至是宏观尺度,包括反溶剂法、热凝胶诱导、pH偏移法等,这些方法都是通过改变制备条件使得所用材料发生沉淀的过程<sup>[14]</sup>。由下而上构建法成本低,无需大型设备,技术操作更为简单,产生的液滴尺寸均匀,但存在耗时长、效率低的局限性。

**1.2.1 反溶剂法** 反溶剂法是通过在溶剂中加入反溶剂,使得溶质溶解度下降而聚集形成颗粒的方法。对于醇溶蛋白,制备纳米输送体系时,可将多酚和醇溶蛋白一同溶解至有机相中,滴入作为反溶剂的水中;滴加过程中,乙醇分子在水相中迅速扩散,在醇溶蛋白周围的极性环境中出现大量含有疏水氨基酸的醇溶蛋白自发收缩聚集形成纳米颗粒。焦岩等<sup>[15]</sup>采用反溶剂法以玉米醇溶蛋白为载体包埋叶黄素,包封率为81%,制得的球形纳米粒子粒径为398.3 nm。Salah等<sup>[16]</sup>通过反溶剂法制备 $\beta$ -乳球蛋白-花青素纳米粒子,粒径为172~199 nm。DSC谱图显示 $\beta$ -乳球蛋白-花青素纳米粒子的吸热峰升高至150 °C,具有良好的热稳定性;被包埋后花青素的生物利用度从8%提高至22%。

**1.2.2 pH偏移法** pH偏移法是指将溶液体系pH值从中性调至极酸或极碱,诱导蛋白结构发生变化并与生物活性物质结合,再将pH调至中性而促使纳米粒子形成的方法。其操作简单,不引入有机试剂,但是部分植物多酚在强碱性条件下会发生降解。Tian等<sup>[17]</sup>将 $\beta$ -伴大豆球蛋白溶液的pH调至12,加入橙皮素和橙皮苷粉末后,搅拌一定时间再调至中性,离心得到上清液即为 $\beta$ -伴大豆球蛋白橙皮素/橙皮苷纳米复合物,粒径均在60 nm以下。pH的改变有助于促进 $\beta$ -伴大豆球蛋白疏水基团暴露,从而与橙皮素中的苯环和橙皮苷中的糖苷发生疏水相互作用。Du等<sup>[18]</sup>采用pH偏移法利用山羊奶酪蛋白肽包埋姜黄素,得到104.6 nm的球形纳米粒子,有效提高了姜黄素的稳定性。纳米粒子在4,25 °C下贮藏15 d后,保留率比游离姜黄素分别高约75%,55%。37,50,70,90 °C下孵育40 min后,纳米粒子保留率均显著高于游离姜黄素。

**1.2.3 热诱导凝胶法** 当加热温度高于蛋白质变性起始

温度时,蛋白质的结构逐渐展开致使其内部的疏水基团暴露,此时分子间疏水相互作用促使蛋白质聚集甚至凝胶化,在聚集过程中可与植物多酚发生相互作用,即热诱导凝胶法。Du 等<sup>[19]</sup>将大豆分离蛋白于 95 ℃ 加热 15 min 后冷却,加入溶于乙醇的姜黄素,反应后旋蒸除去乙醇,获得粒径为 118 nm 的纳米粒子。Brunna 等<sup>[20]</sup>将  $\beta$ -乳球蛋白于 100 ℃ 加热 60 min 并加入 50 mmol/L 的 NaCl 溶液中,该体系具有最优的泡沫稳定性和乳液稳定性,且对槲皮素、芦丁、柚皮苷和维生素 B<sub>2</sub> 均有良好的包埋效果,包封率分别为 96.50%,89.04%,67.78%,36.39%。

## 2 蛋白基植物多酚纳米载体研究进展

### 2.1 动物蛋白基植物多酚纳米载体

**2.1.1 酪蛋白** 酪蛋白是牛奶中的主要蛋白,包含  $\alpha_{s1}$ -酪蛋白、 $\alpha_{s2}$ -酪蛋白、 $\beta$ -酪蛋白和  $\kappa$ -酪蛋白 4 种组分。在溶液中,酪蛋白以多个单体聚集而成的胶束形式存在,主要通过非共价相互作用来维持。这些非共价相互作用可以通过物理化学处理消除,包括改变 pH 值、加热、高压或超声处理等。在适当的条件下,解离的酪蛋白可以重新组装形成与天然酪蛋白胶束相似的结构。解离和重构是利用酪蛋白胶束作为疏水性生物活性物质的纳米载体的有效方法。吴雪娇等<sup>[21]</sup>利用酪蛋白与麦芽糊精进行自组装,两者通过次级力形成较弱的复合物,使酪蛋白暴露了更多的亲水基团,在 pH 为 7 时反应 25 h,溶解度显著提高至约 90%。酪蛋白-麦芽糊精纳米复合物对原花青素的包封率达到 93%,并呈光滑紧凑的球状结构,平均粒径为 158.69 nm。另外,酪蛋白酸盐,如酪蛋白酸钠、酪蛋白酸钙等,在适当的条件下也可以自组装形成胶束状结构,可以作为植物多酚的纳米载体<sup>[22]</sup>。

**2.1.2 乳清蛋白** 乳清蛋白是从乳清中得到的球状蛋白质,约占牛乳总蛋白的 20%,主要由  $\beta$ -乳球蛋白和  $\alpha$ -乳白蛋白组成,并含有少量乳铁蛋白、免疫球蛋白、血清白蛋白、糖巨肽、酶和生长因子,含有人体所有的必需氨基酸,营养价值高,易消化吸收。乳清蛋白在组装成纳米结构前需变性或破坏,使乳清蛋白的结构展开或解离从而荷载生物活性物质。钱柳等<sup>[23]</sup>将乳清蛋白经热处理后,包埋矢车菊素-3-O-葡萄糖苷(C3G)。在模拟胃肠液消化 4 h 后,乳清蛋白-C3G 纳米粒子对 C3G 的保留率比游离 C3G 提高 22%,有效改善了 C3G 的胃肠消化稳定性。乳清蛋白-C3G 纳米粒子在模拟胃、肠液中的释放率分别为 18%,87%,表明乳清蛋白-C3G 纳米粒子可以控制 C3G 在肠道释放并发挥功能作用。

$\beta$ -乳球蛋白约占乳清蛋白总量的 50%,含有由 8 条反向折叠的多肽链形成的疏水空腔,该空腔是结合疏水性物质的重要位点。Xie 等<sup>[24]</sup>研究了植物多酚与牛血清白蛋白、卵清蛋白和  $\beta$ -乳球蛋白的相互作用,其中  $\beta$ -乳球

蛋白具有最高的结合能力,可与单宁酸组成更加稳定的复合物。Salah 等<sup>[25]</sup>以  $\beta$ -乳球蛋白制备纳米输送载体包埋花青素,DSC 热谱图显示  $\beta$ -乳球蛋白-花青素纳米粒子吸热峰的出现比花青素高 18 ℃,表明花青素的热稳定性得到提高,而且生物利用度从 11.27% 提高到 19.23%。

利用乳清蛋白制备纳米输送载体时,其潜在致敏性也引起学者的关注。过敏主要由免疫球蛋白 E(IgE)介导的反应引起,可导致各种临床症状,如腹泻和生长迟缓等。研究<sup>[26]</sup>发现,植物多酚与过敏蛋白的作用可能掩盖或改变 IgE 位点或阻断 IgE 位点结合。Xu 等<sup>[27]</sup>研究表明,乳清蛋白-绿原酸结合物显示出比单独乳清蛋白更低的 IgE 结合能力。利用好植物多酚与乳清蛋白的相互作用既能减轻乳清蛋白的致敏性,又能充分发挥植物多酚的生理活性优势。

**2.1.3 白蛋白** 白蛋白是一种水溶性球状蛋白,富含二硫键,在一定条件下可通过分子间和分子内的二硫键-巯基交换反应进行自组装,而且其表面载有大量活性基团可被用来结合配体和进行其他的功能性修饰。白蛋白在药物输送方面已经取得一些成效,但因其成本较高,在食品中的应用较少。牛血清白蛋白(BSA)和人血清白蛋白(HSA)是制备药物纳米输送载体的常用材料。BSA 是一种从牛血清中获得的水溶性蛋白质,与 HSA 具有高度相似性<sup>[28]</sup>。研究<sup>[29]</sup>表明,负载姜黄素的 BSA 蛋白纳米粒子呈球形,粒径为 92 nm,包封率为 78%,纳米粒子溶血活性低,具有生物相容性。Desale 等<sup>[30]</sup>采用 BSA 对紫杉醇进行包埋,可使紫杉醇的生物利用度提高 2.5 倍。与其他纳米输送载体相比,HSA 具有非免疫源性的优势,基本不会与人体产生免疫反应<sup>[31]</sup>。Yuan 等<sup>[32]</sup>制备了槲皮素-人血清白蛋白(HSA)纳米复合物,包封率为 68.99%,槲皮素-HSA 纳米复合物可减弱 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 对细胞的伤害,对受损细胞的修复程度比游离槲皮素高 19%。

### 2.2 植物蛋白基植物多酚纳米载体

**2.2.1 玉米醇溶蛋白** 玉米醇溶蛋白是玉米中主要的贮藏蛋白,其表面含有超过 50% 的疏水性氨基酸残基,使玉米醇溶蛋白难溶于水,其良好的两亲性和自组装特性使之被广泛应用于纳米输送载体的植物蛋白中。周浓等<sup>[33]</sup>以玉米醇溶蛋白负载番石榴黄酮,得到粒径为 500 nm 的球形纳米粒子,制备的纳米粒子能有效抑制 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 诱导 HepG2 细胞产生的氧化损伤。Zou 等<sup>[34]</sup>将槲皮素包埋于玉米醇溶蛋白中,制得粒径约为 150 nm 的球形纳米粒子,包封率为 76%。玉米醇溶蛋白-槲皮素纳米粒子在 pH 2~8、90 ℃ 加热 2 h 和 NaCl 浓度为 0~2 mol/L 下均能保持良好的稳定性,且其对 ABTS 自由基清除能力和铁离子还原能力均高于游离槲皮素。与游离槲皮素相比,玉米醇溶蛋白-槲皮素纳米粒子有更显著的活性氧(ROS)清除能力。

2.2.2 大豆蛋白 大豆蛋白来源广泛、资源丰富,主要分为大豆球蛋白和 $\beta$ -伴大豆球蛋白,在高温、pH或离子强度等外部环境变化时,大豆蛋白亚基之间的非共价相互作用被破坏,会形成新形态的聚集体,这种形态变化有利于对生物活性物质进行封装。植物多酚被封装在大豆蛋白结构中,不仅水溶性、稳定性和生物利用度提高,且在某些情况下能在肠道进行持续释放。Wang等<sup>[35]</sup>利用大豆分离蛋白作为纳米输送载体开发了新型姜黄素纳米输送体系,获得包封率(88%)较高的纳米粒子。在模拟肠液中释放率为81%,远高于模拟胃液中的(37.9%),可保护姜黄素在肠道进行缓慢释放;该纳米粒子在pH 3~9、温度30~90℃和盐浓度0~40 mmol/L下均表现出良好的稳定性。

2.2.3 米糠蛋白 米糠是一类产量大、价格低廉的谷物加工副产物,其蛋白营养价值高,过敏性低。常通过乳化法制备米糠蛋白纳米乳液作为植物多酚的纳米输送载体。纳米乳液是由两种不相溶的胶体分散体——水和油的混合物以及降低两相之间界面张力所需的合适乳化剂组成。与传统乳液相比,纳米乳液具有更小的液滴尺寸,可防止在贮藏过程中发生沉淀或乳化,延长食品的新鲜度和贮藏时间。

米糠蛋白作为一种天然大分子乳化剂,能为纳米乳液的形成提供表面活性。Chen等<sup>[36]</sup>利用米糠蛋白制备纳米乳液包埋槲皮素,该纳米乳液在碱性条件和低盐离子浓度下表现出良好的稳定性。封装后槲皮素的生物利用度从1.4%增加到12.7%。当槲皮素浓度为0.5 mol/L时,游离槲皮素和纳米乳液的细胞活力分别为86.84%和94.63%,表明纳米乳液的封装降低了槲皮素对细胞的毒性。同时纳米乳液增加了槲皮素的细胞渗透率,达 $4.93 \times 10^{-6}$  cm/s,比游离槲皮素高 $2 \times 10^{-6}$  cm/s。Liu等<sup>[37]</sup>将姜黄素以95.94%的包封率封装至基于米糠蛋白的纳米乳液中,纳米乳液的DPPH自由基清除能力为90.87%,高于游离姜黄素的(70.12%);与纳米乳液相比,游离姜黄素对ROS产生的抑制作用较弱,二者存在显著性差异;在MCF-7细胞系中,姜黄素纳米粒子对肿瘤细胞的抑制效果是游离姜黄素的1.66倍。综上,纳米乳液的抗氧化活性、抗炎活性和对肿瘤细胞的抗增殖活性均优于游离姜黄素。

2.2.4 其他植物蛋白 近年来,植物蛋白以其结构及功能特性优势成为食品和医药领域活性物质输送载体的研究热点,豌豆蛋白<sup>[38]</sup>、藜麦蛋白<sup>[39]</sup>、绿豆蛋白<sup>[40]</sup>和向日葵蛋白<sup>[41]</sup>等植物蛋白纳米输送载体的研究开发也逐渐被报道。植物蛋白对于植物多酚具有良好的包埋和保护作用,为植物多酚在功能性食品的应用提供了一种新的途径,但植物蛋白存在溶解度低、易致敏等局限性,需要对其结构进行改性或修饰,其载体性能还有待于进一步的

研究和开发。

### 2.3 酶解物基植物多酚纳米载体

酶水解一方面改善了蛋白质的功能特性和界面特性,另一方面在酶解过程中产生的肽段往往还具有许多生理活性,对抗氧化、抗炎以及抗肿瘤均有一定的积极影响。蛋白酶解物具有天然的两亲性优势,可以利用非共价相互作用力,如氢键、静电相互作用和疏水相互作用等,自组装形成新的结构制备出纳米纤维、纳米管、纳米粒子等形式来输送植物多酚。韦翠兰等<sup>[42]</sup>发现经酶解后获得的小麦蛋白酶解物具备良好的界面活性,并以此为材料构建了荷载槲皮素的纳米输送体系,粒径约为75 nm,并将槲皮素溶解度提高了近16倍。Yuan等<sup>[43]</sup>将姜黄素包埋在大豆蛋白酶解物中,制备的纳米粒子粒径约80 nm,分布均匀,姜黄素的生物利用度从10%提高到85%。

与天然蛋白质相比,有限的酶水解可以提高蛋白质对疏水性化合物的递送能力,并开发出具有更小尺寸和稳定性更高的纳米载体<sup>[44]</sup>。Zhang等<sup>[45]</sup>将北方大豆蛋白酶解物作为纳米输送载体运输姜黄素,结果发现有限的水解(当水解度 $\leq 7\%$ 时)使载体的负载能力提高了约50%。Lan等<sup>[46]</sup>以菜籽粕衍生肽成功包埋 $\beta$ -胡萝卜素,并发现随着水解时间的延长,包封率逐渐提高到80%以上后趋于稳定;但是形成的纳米粒子的形状和尺寸不规则,可能是由于不同水解时间下的菜籽粕衍生肽的分子量和表面疏水性存在差异。

## 3 蛋白基纳米载体交联剂研究进展

蛋白质在等电点附近容易发生絮凝,且蛋白基纳米粒子易受盐离子和蛋白酶的影响,从而导致纳米输送体系包封率低和稳定性差。研究<sup>[47]</sup>表明,在蛋白质纳米载体的基础上引入交联剂对纳米粒子进行修饰,可得到包封效率更高、缓释效果更好的纳米输送材料。在药物输送体系开发中,为提高药物输送效率,常使用合成交联剂,常见的有戊二醛、硼酸、N,N'-亚甲基双丙烯酰胺等<sup>[47]</sup>。合成交联剂潜在的毒性使其不适于食品领域,而食品领域多采用天然材料多糖、表面活性剂等与蛋白质进行复合提高纳米输送体系的稳定性。

### 3.1 多糖

多糖具有无毒无害、生物相容性好和来源广泛等优势。壳聚糖是常用的一种阳离子多糖,可为蛋白质纳米载体提供空间位阻作用及静电稳定效应。Pauluk等<sup>[48]</sup>制备出包埋白藜芦醇的玉米醇溶蛋白-壳聚糖纳米粒子,壳聚糖的存在提高了白藜芦醇在模拟胃肠液中的稳定性,与未添加壳聚糖的玉米醇溶蛋白纳米粒子相比,玉米醇溶蛋白-壳聚糖纳米粒子在模拟胃肠道中释放率降低了10%,被认为具有更好的缓释特性。果胶是常用的

一类阴离子多糖,可与带正电的蛋白质基团产生强烈的静电吸引。Guo 等<sup>[49]</sup>将姜黄素包埋在豌豆分离蛋白和果胶的复合物中,表现出比游离姜黄素更好的光和热稳定性:紫外线照射 90 min 后,姜黄素在高酯化果胶纳米粒子中保留率为 53.32%,远高于游离姜黄素的(5%);85 ℃水浴 90 min 后,高酯化果胶纳米粒子的姜黄素保留率约为 50%,远高于游离姜黄素的(10%)。该研究还发现酯化程度高的果胶具有更好的包埋效果,比低酯化程度的果胶纳米粒子高约 10%。

### 3.2 表面活性剂

在蛋白质纳米载体的基础上加入表面活性剂可以改善其在高离子强度下的稳定性。Sun 等<sup>[50]</sup>将酪蛋白酸钠加入玉米醇溶蛋白中以包埋二氢杨梅素,制得的纳米粒子在模拟肠液中的保留率比游离二氢杨梅素的高 9%,二氢杨梅素包埋后生物利用度提高了 1.95 倍。Poureini 等<sup>[51]</sup>以玉米醇溶蛋白与卵磷脂结合包埋芹菜素,制备出的纳米粒子的光稳定性(73%)高于单独玉米醇溶蛋白(38%)或卵磷脂(44%)与芹菜素制得的纳米粒子,玉米醇溶蛋白—卵磷脂—芹菜素纳米粒子在 30 d 的贮藏过程中表现出良好的稳定性。

### 3.3 交联剂联用

在制备纳米输送体系时,采用多种交联剂共同作用,可能出现相互协同作用,进一步提高纳米粒子的稳定性。Veneranda 等<sup>[52]</sup>采用酪蛋白酸钠、果胶作为交联剂制备玉米醇溶蛋白—酪蛋白酸钠—果胶三元纳米复合物包埋丁香酚,得到的纳米粒子具有更小的尺寸(140 nm),并呈现出优异的再分散性。Khan 等<sup>[53]</sup>利用海藻酸盐中带负电荷的羧酸盐部分与壳聚糖中带正电荷的胺基相互作用形成聚电解质复合物,可以提高包埋物质的稳定性。制得的三元纳米粒子粒径约为 160.9 nm,海藻酸盐—壳聚糖复合层改善了玉米醇溶蛋白纳米粒子中白藜芦醇的释放和生物利用度,三元纳米粒子在模拟胃液中释放的白藜芦醇从 77% 减少至 31%,生物利用度从 50% 提高至 81%。

## 4 结语

采用蛋白质作为植物多酚的纳米输送载体,可以有效提高植物多酚的稳定性、溶解度和生物利用度,有利于发挥植物多酚对人体健康的有益作用,并拓展其在食品领域中的应用范围。目前关于蛋白基纳米输送载体的研究已经涉及到多种蛋白,但单一的蛋白基植物多酚纳米输送载体还存在包封率低、稳定性差及胃肠控释性能低等问题。后续研究可考虑采用天然大分子复合材料共同构建植物多酚的纳米输送载体,以保证对植物多酚的有效输送;同时应重点开展蛋白基纳米颗粒和被包埋的植物多酚在生物体内消化吸收代谢情况的研究,进而解释

其吸收和代谢机制,通过毒理学试验评估制备出的纳米输送体系对人体健康和环境的影响,为利用蛋白基纳米输送载体开发植物多酚功能性食品提供理论依据。

## 参考文献

- [1] LUND M N. Reactions of plant polyphenols in foods: Impact of molecular structure[J]. Trends in Food Science & Technology, 2021, 112: 241-251.
- [2] SERRA D, ALMEIDA L M, DINIS T C P. Dietary polyphenols: A novel strategy to modulate microbiota-gut-brain axis[J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 78: 224-233.
- [3] HU B, LIU X, ZHANG C, et al. Food macromolecule based nanodelivery systems for enhancing the bioavailability of polyphenols[J]. J Food Drug Anal, 2017, 25(1): 3-15.
- [4] ROCHA S, LUCAS M, RIBEIRO D, et al. Nano-based drug delivery systems used as vehicles to enhance polyphenols therapeutic effect for diabetes mellitus treatment[J]. Pharmacol Res, 2021, 169: 105604.
- [5] TANG C H. Nanocomplexation of proteins with curcumin: From interaction to nanoencapsulation (A review)[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 109: 106106.
- [6] HONG S, DIA V P, BAEK S J, et al. Nanoencapsulation of apigenin with whey protein isolate: Physicochemical properties, in vitro activity against colorectal cancer cells, and bioavailability[J]. Lebensm Wiss Technol, 2022, 154: 112751.
- [7] BAZANA M T, CODEVILLA C F, DE MENEZES C R. Nanoencapsulation of bioactive compounds: Challenges and perspectives[J]. Current Opinion in Food Science, 2019, 26: 47-56.
- [8] ZHANG H, WANG T, HE F, et al. Fabrication of pea protein-curcumin nanocomplexes via microfluidization for improved solubility, nano-dispersibility and heat stability of curcumin: Insight on interaction mechanisms[J]. Int J Biol Macromol, 2021, 168: 686-694.
- [9] LUO X, ZHOU Y, BAI L, et al. Fabrication of beta-carotene nanoemulsion-based delivery systems using dual-channel microfluidization: Physical and chemical stability[J]. J Colloid Interface Sci, 2017, 490: 328-335.
- [10] ZHOU Y, YUE W, LUO Y, et al. Preparation and stability characterization of soybean protein isolate/sodium alginate complexes-based nanoemulsions using high-pressure homogenization[J]. LWT, 2022, 154: 112607.
- [11] JIN B, ZHOU X, ZHENG Z, et al. Investigating on the interaction behavior of soy protein hydrolysates/beta-glucan/ferulic acid ternary complexes under high-technology in the food processing: High pressure homogenization versus microwave treatment[J]. Int J Biol Macromol, 2020, 150: 823-830.
- [12] ZHANG X, ZUO Z, MA W, et al. Assemble behavior of ultrasound-induced quinoa protein nanoparticles and their roles on rheological properties and stability of high internal phase emulsions[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 117: 106748.

- [13] ZHANG X, ZUO Z, YU P, et al. Rice peptide nanoparticle as a bi-functional food-grade pickering stabilizer prepared by ultrasonication: Structural characteristics, antioxidant activity, and emulsifying properties[J]. *Food Chem*, 2021, 343: 128545.
- [14] 程昊. 基于酪蛋白/玉米醇溶蛋白不同载体的功能因子共包埋研究[D]. 无锡: 江南大学, 2020.  
CHENG Hao. Study on casein and zein-based carriers for the co-encapsulation of bioactive components[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2020.
- [15] 焦岩, 韩赫, 常影, 等. 玉米醇溶蛋白负载叶黄素纳米粒的制备与表征[J]. *食品与机械*, 2019, 35(7): 7-12, 97.  
JIAO Yan, HAN He, CHANG Ying, et al. Preparation and characterization of lutein loaded in zein nanoparticles[J]. *Food & Machinery*, 2019, 35(7): 7-12, 97.
- [16] SALAH M, XU X. Anthocyanin- $\beta$ -lactoglobulin nanoparticles in acidic media: Synthesis, characterization and interaction study[J]. *Journal of Molecular Structure*, 2021, 1 232: 129995.
- [17] TIAN Y, XU G, CAO W, et al. Interaction between pH-shifted  $\beta$ -conglycinin and flavonoids hesperetin/hesperidin: Characterization of nanocomplexes and binding mechanism [J]. *LWT*, 2021, 140: 110698.
- [18] DU X, JING H, WANG L, et al. pH-shifting formation of goat milk casein nanoparticles from insoluble peptide aggregates and encapsulation of curcumin for enhanced dispersibility and bioactivity[J]. *LWT*, 2022, 154: 112753.
- [19] DU C X, XU J J, LUO S Z, et al. Low-oil-phase emulsion gel with antioxidant properties prepared by soybean protein isolate and curcumin composite nanoparticles[J]. *LWT*, 2022, 161: 113346.
- [20] D'ONOFRE Couto B, NOVAES Da Costa R, CASTRO Laurindo W, et al. Characterization, techno-functional properties, and encapsulation efficiency of self-assembled beta-lactoglobulin nanostructures[J]. *Food Chemistry*, 2021, 356: 129719.
- [21] 吴雪娇, 吴艳, 李旭娇, 等. 自组装原花青素纳米复合物的构建及表征[J]. *食品研究与开发*, 2020, 41(14): 13-21.  
WU Xue-jiao, WU Yan, LI Xu-jiao, et al. Construction and characterization of self-assembled proanthocyanidin nanocomposites [J]. *Food Research and Development*, 2020, 41(14): 13-21.
- [22] YIN X, DONG H, CHENG H, et al. Sodium caseinate particles with co-encapsulated resveratrol and epigallocatechin-3-gallate for inhibiting the oxidation of fish oil emulsions[J]. *Food Hydrocolloids*, 2022, 124: 107308.
- [23] 钱柳, 米亚妮, 陈雷, 等. 乳清蛋白/矢车菊素-3-O-葡萄糖苷纳米粒的制备[J]. *食品科学*, 2020, 41(10): 14-20.  
QIAN Liu, MI Ya-ni, CHEN Lei, et al. Fabrication and study of whey protein/cyanidin-3-O-glucoside nanoparticles [J]. *Food Science*, 2020, 41(10): 14-20.
- [24] XIE L, WEHLING R L, CIFTCI O, et al. Formation of complexes between tannic acid with bovine serum albumin, egg ovalbumin and bovine beta-lactoglobulin[J]. *Food Res Int*, 2017, 102: 195-202.
- [25] SALAH M, MANSOUR M, ZOGONA D, et al. Nanoencapsulation of anthocyanins-loaded beta-lactoglobulin nanoparticles: Characterization, stability, and bioavailability in vitro[J]. *Food Res Int*, 2020, 137: 109635.
- [26] MAKORI S I, MU T H, SUN H N. Functionalization of sweet potato leaf polyphenols by nanostructured composite beta-lactoglobulin particles from molecular level complexations: A review[J]. *Food Chem*, 2022, 372: 131304.
- [27] XU H, ZHANG T, LU Y, et al. Effect of chlorogenic acid covalent conjugation on the allergenicity, digestibility and functional properties of whey protein[J]. *Food Chem*, 2019, 298: 125024.
- [28] AGUILERA-GARRIDO A, DEL CASTILLO-SANTAELLA T, YANG Y, et al. Applications of serum albumins in delivery systems: Differences in interfacial behaviour and interacting abilities with polysaccharides[J]. *Adv Colloid Interface Sci*, 2021, 290: 102365.
- [29] SALEHIABAR M, NOSRATI H, JAVANI E, et al. Production of biological nanoparticles from bovine serum albumin as controlled release carrier for curcumin delivery[J]. *Int J Biol Macromol*, 2018, 115: 83-89.
- [30] DESALE J. Chemosensitizer and docetaxel-loaded albumin nanoparticle: overcoming drug resistance and improving therapeutic efficacy[J]. *Nanomedicine*, 2018, 13(21): 2 759-2 776.
- [31] KUNDE S S, WAIRKAR S. Targeted delivery of albumin nanoparticles for breast cancer: A review[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2022, 213: 112422.
- [32] YUAN F, WANG P, YANG Y, et al. Quercetin-albumin nano-complex as an antioxidant agent against hydrogen peroxide-induced death of spinal cord neurons as a model of preventive care study[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2020, 13(11): 8 172-8 182.
- [33] 周浓, 余志良, 李承勇. 玉米醇溶蛋白-番石榴黄酮复合纳米颗粒的制备及其抗氧化活性[J]. *食品科学*, 2021, 42(3): 186-193.  
ZHOU Nong, YU Zhi-liang, LI Cheng-yong. Fabrication and antioxidant activity of zein-guava flavonoid composite nanoparticles[J]. *Food Science*, 2021, 42(3): 186-193.
- [34] ZOU Y, QIAN Y, RONG X, et al. Encapsulation of quercetin in biopolymer-coated zein nanoparticles: Formation, stability, antioxidant capacity, and bioaccessibility[J]. *Food Hydrocolloids*, 2021, 120: 106980.
- [35] WANG S, LU Y, OUYANG X K, et al. Fabrication of soy protein isolate/cellulose nanocrystal composite nanoparticles for curcumin delivery[J]. *Int J Biol Macromol*, 2020, 165(Pt A): 1 468-1 474.
- [36] CHEN W, JU X, ALUKO R E, et al. Rice bran protein-based nano-emulsion carrier for improving stability and bioavailability of quercetin[J]. *Food Hydrocolloids*, 2020, 108: 106042.
- [37] LIU C, YANG X, WU W, et al. Elaboration of curcumin-loaded rice bran albumin nanoparticles formulation with increased in vitro bioactivity and in vivo bioavailability [J]. *Food Hydrocolloids*, 2018, 77: 834-842.
- [38] GUO Q, SU J, SHU X, et al. Development of high methoxyl

- pectin-surfactant-pea protein isolate ternary complexes: Fabrication, characterization and delivery of resveratrol[J]. Food Chem, 2020, 321: 126706.
- [39] LIU K, ZHA X Q, LI Q M, et al. Hydrophobic interaction and hydrogen bonding driving the self-assembling of quinoa protein and flavonoids[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 118: 106807.
- [40] MOHAMMADIAN M, SALAMI M, MOGHADAM M, et al. Mung bean protein as a promising biopolymeric vehicle for loading of curcumin: Structural characterization, antioxidant properties, and in vitro release kinetics[J]. Journal of Drug Delivery Science and Technology, 2021, 61: 102148.
- [41] MEHRYAR L, ESMAILI M, ZEYNALI F, et al. Fabrication and characterization of sunflower protein isolate nanoparticles, and their potential for encapsulation and sustainable release of curcumin[J]. Food Chem, 2021, 355: 129572.
- [42] 韦翠兰, 欧阳颖, 王梦萍, 等. 小麦蛋白酶解物-槲皮素复合纳米颗粒的构建及表征[J]. 现代食品科技, 2018, 34(3): 95-100.
- WEI Cui-lan, OUYANG Ying, WANG Meng-ping, et al. Fabrication and characterization of wheat protein hydrolysate-quercetin nanoparticles[J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(3): 95-100.
- [43] YUAN D, ZHOU F, SHEN P, et al. Self-assembled soy protein nanoparticles by partial enzymatic hydrolysis for pH-driven encapsulation and delivery of hydrophobic cargo curcumin[J]. Food Hydrocolloids, 2021, 120: 106759.
- [44] WANG Y H, YUAN Y, YANG X Q, et al. Comparison of the colloidal stability, bioaccessibility and antioxidant activity of corn protein hydrolysate and sodium caseinate stabilized curcumin nanoparticles[J]. J Food Sci Technol, 2016, 53(7): 2 923-2 932.
- [45] ZHANG Y, XIE L, FENG S, et al. Mechanistic study on the nano-complexation between curcumin and protein hydrolysates from Great Northern bean (*Phaseolus vulgaris* L.) for delivery applications in functional foods[J]. LWT, 2021, 139: 110572.
- [46] LAN M, FU Y, DAI H, et al. Encapsulation of  $\beta$ -carotene by self-assembly of rapeseed meal-derived peptides: Factor optimization and structural characterization[J]. LWT, 2021, 138: 110456.
- [47] ALAVARSE A C, FRACHINI E C G, DA SILVA R, et al. Crosslinkers for polysaccharides and proteins: Synthesis conditions, mechanisms, and crosslinking efficiency, a review[J]. Int J Biol Macromol, 2022, 202: 558-596.
- [48] PAULUK D, PADILHA A K, KHALIL N M, et al. Chitosan-coated zein nanoparticles for oral delivery of resveratrol: Formation, characterization, stability, mucoadhesive properties and antioxidant activity[J]. Food Hydrocolloids, 2019, 94: 411-417.
- [49] GUO Q, SU J, SHU X, et al. Production and characterization of pea protein isolate-pectin complexes for delivery of curcumin: Effect of esterified degree of pectin[J]. Food Hydrocolloids, 2020, 105: 105777.
- [50] SUN C C, SU H, ZHENG G D, et al. Fabrication and characterization of dihydromyricetin encapsulated zein-caseinate nanoparticles and its bioavailability in rat[J]. Food Chemistry, 2020, 330: 127245.
- [51] POUREINI F, NAJAFPOUR G D, NIKZAD M, et al. Loading of apigenin extracted from parsley leaves on colloidal core-shell nanocomposite for bioavailability enhancement[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2021, 625: 126867.
- [52] VENERANDA M, HU Qiao-bin, WANG Tao-ran, et al. Formation and characterization of zein-caseinate-pectin complex nanoparticles for encapsulation of eugenol[J]. LWT, 2018, 89: 596-603.
- [53] KHAN M A, YUE C, FANG Z, et al. Alginate/chitosan-coated zein nanoparticles for the delivery of resveratrol[J]. Journal of Food Engineering, 2019, 258: 45-53.

## 信息窗

# 2022 年度“中国食品科学技术学会科技创新奖”申报工作开始

4 月 11 日,中国食品科学技术学会发布通知,2022 年度“中国食品科学技术学会科技创新奖”开始申报工作。

本次申报奖项设置有 3 个,分别为:技术发明奖、技术进步奖、产品创新奖。3 个专项奖均设一、二、三等奖。具体申报范围如下:

(1) 技术发明奖:运用科学技术知识做出的产品、工艺、材料及其系统等重大技术发明。其中整体技术已正式应用二年以上(即 2020 年 7 月 15 日以前)。

(2) 技术进步奖:在技术研究、技术开发、技术创新、应用推广先进科学技术成果促进高新技术产业化,

以及完成重大科学技术工程、计划等方面的成果。其中整体技术已正式应用二年以上(即 2020 年 7 月 15 日以前)。

(3) 产品创新奖:自 2019 年以来的产品创新成果,其中整体技术已正式应用一年以上(即 2021 年 7 月 15 日以前)。

本次申报需由具有推荐资格的单位或理事(专家)推荐。申报截止期为 2022 年 7 月 15 日(以寄出邮戳为准),逾期不予受理。

(来源: <http://news.foodmate.net>)