

多糖—植物蛋白复合物的制备及特性研究进展

Research progress on preparation and characteristics of polysaccharide plant protein complex

张迪¹ 付美玲¹ 费丛璇¹ 李丹丹¹ 修建华²

ZHANG Di¹ FU Meiling¹ FEI Congxuan¹ LI Dandan¹ XIU Jianhua²

(1. 河北科技大学食品与生物学院, 河北 石家庄 050000; 2. 河北省山楂加工技术创新中心, 河北 承德 067300)

(1. College of Food and Biology, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang, Hebei 050000, China; 2. Hawthorn Processing Technology Innovation Center of Hebei Province, Chengde, Hebei 067300, China)

摘要:多糖和蛋白质是食品中两种重要的组成成分,将植物蛋白与多糖结合起来,不仅能更好地发挥两者的优势,还能显示出新的功能特性,改善其自身存在的缺点。文章主要介绍了多糖—植物蛋白复合物的制备及影响因素、多糖—植物蛋白复合物的功能性质以及其应用研究。

关键词:植物蛋白;多糖;制备方法;影响因素;功能性质

Abstract: Polysaccharides and proteins are two important components in food. Combining plant protein with polysaccharides can give full play to their advantages, show new functional characteristics, and improve their shortcomings. In this review, the preparation and influencing factors of polysaccharides-plant proteins complex, the functional properties of the polysaccharide-plant protein complex and its application are introduced.

Keywords: plant protein; polysaccharide; preparation method; influencing factors; functional property

多糖与蛋白质之间的相互作用在生物体系、食品宏观性能调控、食品包装和药物释放等方面起着关键作用。多糖可以通过修饰蛋白表面化学特性和聚集特性,调控蛋白在食品中的功能,但是目前大多数研究都集中在多糖与动物蛋白相互作用的研究上,而近年来,基于宗教和文化饮食习惯的影响,越来越关注动物源食品的安全性,而相对于动物蛋白而言,植物蛋白不仅具有较低的成本优势,而且还能通过对多糖的修饰表现出更加优良的功能特性,因此将植物蛋白与多糖进行复合逐渐受到人们的关注。

多糖与蛋白质是决定食品品质的主要因素。多糖是一种由10个以上的单糖分子组成的大分子,其在动物细胞膜以及植物和微生物细胞壁中均有分布。蛋白质是由肽键连接的氨基酸构成,而氨基酸中含有多种官能团,可以与多糖的官能团发生静电相互作用,如氢键和范德华力等。通过这些作用力形成生物聚合物,从而能够综合多糖和蛋白质两种生物大分子的性质,表现出乳化和稳定的双重作用。

植物蛋白属于蛋白质的一种,来自于植物,尤其是在豆类中极为突出。而多糖作为一种生物大分子,具有抗病毒、抗癌、抗肿瘤、降血脂、免疫调节等功能,将两者结合能够更好地发挥出某些特定性质。文章拟介绍多糖—植物蛋白复合物的制备及影响因素、多糖—植物蛋白复合物的功能性质及其应用研究,以期为更好地利用和发挥多糖—植物蛋白复合物的功能性质提供依据。

1 多糖—植物蛋白复合物的制备及影响因素

1.1 制备方法

1.1.1 干热法 干法加热被广泛应用于蛋白质和多糖复合物的制备。由于共轭反应是在封闭的干燥系统中进行的,因此影响干热法制备复合物的因素较多,如反应温度、反应湿度、反应时间、底物的结构和比例等^[1]。但在蛋白质—多糖复合物制备过程中,存在着反应条件不够温和、耗时过久、产率不高等问题。干热法虽可以提高蛋白质—多糖复合物的许多性能,但其反应条件非常苛刻,且反应时间较长,对干热法的实际应用造成了很大影响。

1.1.2 湿热法 湿热法通常指的是在水浴或油浴加热条件下,将一定比例的蛋白质与多糖溶液反应一定时间,再进行冷却,从而得到多糖—蛋白质复合物。与干热法相比,湿法加热所需的时间通常较短,因为共轭可以在更高

作者简介:张迪,女,河北科技大学在读硕士研究生。

通信作者:李丹丹(1981—),女,河北科技大学副教授,博士。

E-mail: 81536487@qq.com

收稿日期:2023-08-16 改回日期:2024-03-18

的温度下发生,且蛋白质—多糖混合物无需冷冻干燥可直接反应。虽然湿热法较干热法在反应速度上有所提高,但主要集中在结构简单的蛋白质和小分子糖之间的反应。因此,为了弥补传统方法中的不足,出现了一些新型加工技术。

1.1.3 超声波法 超声波具有良好的方向性,也具有很强的穿透力,可以更好地将声能集中起来。因为活性氨基酸位点一般隐藏在蛋白质内部,所以会造成蛋白质和多糖之间的共价作用比较弱。而高强度超声波所产生的能量,可以加快蛋白质的展开和肽键的断裂,并使某些疏水基团暴露在蛋白质表面^[2],从而增加了蛋白质和多糖之间反应基团的碰撞,提高了接枝度。但目前关于超声波技术促进美拉德反应机制的研究较少,需进一步探索超声波加速美拉德反应的机制,并建立相应的反应动力学模型,将其与产品的结构和功能特性结合起来。

1.1.4 微波法 微波法是指在 300 MHz~300 GHz 的电磁波下,蛋白质分子中二硫键断裂,疏水基团暴露,从而促进蛋白质分子的解聚,同时还能使多糖的碳链解缠并重排。相比于干热和湿热法,微波技术利用分子振动进行能量传输,实现了快速加热,大大减少了反应时间,提高了复合物的功能性。然而,微波加热的不均匀性是微波技术的短板,可能会影响食品质量,因此,应继续对该领域进行深入研究。

1.2 影响因素

蛋白质和多糖分子间的结合方式包括共价相互作用、静电相互作用、疏水相互作用、氢键、范德华力和空间排斥等^[3]。这些相互作用方式会使复合物表现出不同现象,而多糖—蛋白复合物不同现象的发生与生物聚合物的性质有关(见表 1)。此外,还与环境条件密切相关,如生物聚合物浓度、质量比、pH 值、离子强度、温度和压力等。吴周山等^[8]将不同分子量葡聚糖与花生分离蛋白发生接枝反应形成共价聚合物。结果表明,分子量为 20 kDa 的葡聚糖的改善程度最为明显。Zhang 等^[11]研究了大豆分离蛋白(SPI)和金针菇多糖(FVP)的复杂凝聚。结果表明,低 NaCl 浓度有利于形成 SPI 和 FVP 凝聚物的致密结构;而高 NaCl 浓度有助于 α 螺旋的形成,但不利于 β 片的形成。Li 等^[12]研究了涡流流体装置(VFD)和剪切均质处理的大豆分离蛋白与壳聚糖(SPI 与 CS)和大豆分离蛋白与羧甲基纤维素(SPI 与 CMC)凝聚物的水相行为和流变特性,相行为和微观结构方面的表征结果表明,VFD 和剪切均质处理仅影响 SPI 与 CS 配合物,说明处理方式对聚合物的理化性质有影响。

2 多糖—植物蛋白复合物的功能性质

2.1 乳化稳定性

多糖—蛋白质复合物表现出良好的乳化性能是因为

表 1 多糖—植物蛋白复合物的制备及特性研究

Table 1 Preparation and characterization of polysaccharide plant protein complex

复合物	制备方法	影响因素	结论	文献
豌豆分离蛋白(PPI)和黄芷胶(TRAG)	湿热法	pH、混合比例	当 pH 为 4.5,PPI 与 TRAG 比值为 2 : 1 时,PPI-TRAG 具有良好的生物活性	[4]
绿豆淀粉和亚麻籽蛋白	湿热法	黄芪多糖添加量	黄芪多糖可以改善淀粉与蛋白质复合体系的结构和质构特性,该凝胶可能成为潜在的功能性和吞咽困难食品	[5]
马铃薯淀粉和大豆肽	湿热法	水分含量	湿热处理显著改变了马铃薯淀粉和大豆肽复合物的理化特性和消化特性	[6]
玉米醇溶蛋白和多糖(果胶、羧甲基纤维素、阿拉伯胶)	pH 加热诱导	多糖类别	提供了一种新的制造交联蛋白质与多糖复合纳米颗粒方法,具有良好的胃肠道稳定性,具有作为口服递送载体的潜力	[7]
葡聚糖和花生分离蛋白	搅拌均匀	葡聚糖的分子量	分子量为 20 kDa 的葡聚糖能明显改善花生分离蛋白的乳化性和乳化稳定性	[8]
玉米醇溶蛋白和多糖(阿拉伯胶、壳聚糖)	超声波法	超声波频率、功率、时间	超声波处理显著提高了对白藜芦醇的包埋率和负载量,复合物稳定性、贮藏稳定性、乳化活性和乳化稳定性显著增强	[9]
大豆分离蛋白和柑橘果胶	微波干加热和传统干加热	微波功率	微波加热的偶联物表现出良好的乳化和乳液稳定特性,抑制蔬菜菜肴中亚硝酸盐形成的能力高于传统干加热偶联物	[10]

蛋白质可有效吸附在分散的油水界面上,在乳化体系形成中发挥乳化剂的作用,并且将蛋白质和多糖复合后,油水界面中的分子可以结合更多的水分子,减缓了分散相油滴聚集和油脂分离的过程,改善了蛋白质乳状液的稳定性^[13]。

耿肖倩^[14]以酶解改性获得的高溶解性改性米渣蛋白为研究对象,探讨了其与黄原胶的相互作用及复合物的特性,并将复合物应用于乳浊体系中,提升了乳浊液的稳定性。皇甫云鹏等^[15]采用碱处理法和湿法美拉德反应将单宁酸、麦芽糊精、聚葡萄糖共价接枝到大豆分离蛋白上,并对大豆分离蛋白—单宁酸—多糖三元复合物功能特性和结构进行了分析,该复合物表现出优异的溶解性、乳化性、抗氧化活性、起泡性、表面疏水性和热稳定性。Monteiro等^[16]采用美拉德反应,用干加热法制备了蛋白质与多糖的偶联物,结果表明,蛋白质与多糖形成的偶联物具有良好的乳化性质和起泡能力。Xiao等^[17]研究了加热时间对酶解大米蛋白—葡萄糖美拉德反应产物的影响,发现90 min时该复合物的反应程度最大,此时美拉德反应和热降解过程分离,乳化活性随反应时间的延长而提高,且该复合物在美拉德反应后获得了更大的抗氧化活性。

2.2 溶解性

蛋白质—多糖共价复合物由于多糖链的引入,多羟基的亲水性使蛋白质分子的溶解性得到提高,甚至可以改变蛋白质在其等电点处的溶解特性。Guldiken等^[18]将1种多糖(甜菜果胶、阿拉伯树胶、瓜尔豆胶、结冷胶)与豌豆分离蛋白以质量比1:1混合,得到了形成可溶性复合物的关键pH值。利用液滴尺寸、电荷、目视观察、微观结构和加速重力分离来表征乳液稳定性,根据多糖来源,可以在所需的pH范围内获得可溶性复合物,即使在蛋白质的等电点附近也可以稳定O/W乳液。Rodrigues等^[19]发现纯蛋白质在吸附时会形成一层薄而坚硬的薄膜,纯多糖在吸附时会形成一层厚厚的黏弹性膜,而将两者结合可形成可溶性复合物,且具有更好的润滑性。王晓杰等^[20]通过壳聚糖催化糖基化反应修饰玉米醇溶蛋白,在转谷氨酰胺酶的催化下,糖基化玉米醇溶蛋白的表面疏水性降低,水溶性显著改善。

2.3 热稳定性

热处理在食品加工中是不可避免的,然而,热处理可能导致蛋白质变性或聚集,降低其溶解度和营养价值,这对于含有蛋白质的产品是非常不可取的,而蛋白质—多糖共价复合物能明显改善蛋白质的热稳定性。王胜男等^[21]通过大豆乳清蛋白与大豆种皮多糖形成聚合物,制备了稳定的高内相乳液,且随着多糖添加量的增加,聚合物的微观结构更加致密,热稳定性也有所提高。Wen

等^[22]研究发现,采用大豆分离蛋白—香菇多糖偶联物制备的乳液具有较好的热稳定性。在食品加工中,可以通过在蛋白质中添加适量多糖来改善复合物的热稳定性。

2.4 泡沫稳定性

蛋白质是一种具有较低界面张力的两亲性大分子,具有较强的稳定性。同时,其在空气和水界面上可形成一层黏稠的薄膜,具有较高的稳定性。蛋白质与多糖共同作用可提高泡沫的稳定性,然而,发泡能力和稳定性对分子的要求不同。Han等^[23]通过超声辅助湿热法制备了花生分离蛋白和玉米丝多糖的共价复合物,通过增加多糖添加量,复合物的发泡性、泡沫稳定性和溶解度显著提高。因此,多糖含量的增加有助于复合物向优良性质的改变。张雪等^[24]以鹰嘴豆分离蛋白(CPI)和卡拉胶(CG)为原料,根据蛋白与多糖复合体系界面行为的测定,在CPI中添加适当比例的CG,复合物的起泡性、持水性及持油性均有一定程度的改善。朱颖等^[25]将可溶性多糖与黑豆蛋白进行复合,随着超声处理时间的延长,复合物的泡沫稳定性逐渐下降,这是因为延长超声处理时间,蛋白质分子结构打开更完全,分子间重新聚集形成了更大的聚集体,表现为溶液表面膜的稳定性下降,起泡能力下降。

2.5 凝胶性

蛋白质与多糖之间可通过疏水作用、二硫键、氢键、静电作用等发生交联及凝胶化。潘泓杉等^[26]将金针菇多糖添加到大豆分离蛋白水凝胶中,当金针菇多糖添加量为5%时,金针菇多糖—大豆蛋白凝胶的3D打印精确度和稳定性最高,说明多糖的添加提高了水凝胶强度、持水性和热稳定性。朱艳云^[27]基于银耳多糖与其他蛋白的凝胶性,研制了银耳多糖果冻。Wang等^[28]研究了凉粉草多糖(MBP)对葡萄糖酸诱导SPI凝胶微观结构和凝胶性能的影响。结果表明,MBP的添加使凝胶表面更光滑,说明静电相互作用在维持凝胶网络结构中起重要作用。侯芙蓉^[29]以铁皮石斛多糖和黄原胶进行复合,发现在一定条件下,可以形成性能较好的热可逆和热不可逆凝胶。因此,多糖—植物蛋白复合物在未来的蓄冷剂产品中具有一定的应用价值。

3 多糖—植物蛋白复合物的应用研究

蛋白质与多糖通过复合反应形成的复合物具有优良的功能特性。汪少芸等^[30]总结了蛋白质—多糖复合物多尺度体系及其功能特性,如纳米颗粒、水凝胶、乳液体系、聚电解质复合物、胶束、微胶囊等,同时也发现蛋白质多糖复合物在生物活性物质递送载体、乳液稳定剂、复合膜材料^[31]、脂肪替代物等方面具有良好的应用前景。梁洛丹等^[32]总结了蛋白质和多糖可以通过非共价或共价相互作用形成蛋白质—多糖复合物,从而用作包埋活性成分

的材料,能够提高生物活性成分的稳定性和生理活性。

3.1 纳米颗粒及应用

核壳结构是蛋白质—多糖混合纳米颗粒最常见的形态之一。为了生产核壳纳米颗粒,首先创建蛋白质纳米颗粒作为内芯,然后在蛋白质核心上涂上亲水多糖作为外壳结构来形成颗粒。核壳纳米颗粒通常用于包封和递送疏水生物活性化合物,其主要与疏水蛋白发生疏水相互作用,蛋白质内芯为被包裹的化合物提供了良好的保护,而多糖壳层通过产生强烈的空间排斥和静电排斥来防止颗粒聚集并提高复合物的稳定性。

复合纳米颗粒是在装载生物活性化合物前通过蛋白质—多糖复合物的形成生成的,由于其稳定的性质通常作为包封材料来封装一些不稳定的生物活性物质。Li 等^[33]利用玉米蛋白和可溶性大豆多糖制备了纳米颗粒用于包封疏水性槲皮素,结果表明,复合纳米颗粒的包封效率大大提高,此外,复合纳米颗粒中槲皮素的光化学稳定性和 ABTS 自由基清除能力显著增强。He 等^[34]制备了大豆分离蛋白—葡聚糖偶联物,并使用该偶联物包封姜黄素形成纳米颗粒,该复合物提高了姜黄素的溶解度,增强了其抗氧化能力。不同蛋白质—多糖纳米复合物的不同特征以及能够将姜黄素加载到纳米复合物中的封装机制,从而将负载姜黄素的生物聚合物纳米颗粒应用到未来食品行业中^[35]。

3.2 水凝胶及应用

水凝胶通过聚合物在物理、离子或共价相互作用下交联形成三维网络,可以捕获大量的水^[36]。制备蛋白质—多糖水凝胶的常用方法为复合凝聚,随后热处理诱导凝胶化,且加热过程可以增强水凝胶在不同环境刺激下的稳定性,并实现负载食物生物活性物质的持续释放。蛋白质—多糖纳米凝胶具有装载量大、释放可控、生物可及性好、化学稳定性好、对环境刺激反应灵敏等优点^[37],是生物活性成分的重要载体。

水凝胶主要用于包封亲水化合物(如叶酸和核黄素),但也可以递送疏水生物活性物质(如姜黄素)。因具有低毒、可食用、生物相容性、生物降解性和可负担性,水凝胶能够对改善人类健康的常见食物功能因子(多酚、类黄酮、类胡萝卜素、维生素和益生菌等)进行封装,从而提高营养物质的稳定性和生物利用度^[38]。Wang 等^[39]采用漆酶诱导交联和后热处理制备了大米谷蛋白和甜菜果胶复合凝胶。结果表明,适当的钙离子浓度可以增强复合凝胶的凝胶性能,从而将复合凝胶应用于生物活性组分的包封。因此,蛋白质—多糖水凝胶也可在未来逐步应用至各类生产生活中。

3.3 乳液体系及应用

与单个蛋白质或多糖相比,蛋白质—多糖复合物具

有较强的乳化稳定性可以更好地保护被包裹化合物,因此被广泛用于制备基于乳化的递送系统。蛋白质—多糖复合物常被用作乳化剂,可制备常规乳剂、纳米乳剂、多层乳剂和皮克林乳剂等不同类型的乳剂。常规乳剂的平均液滴半径为 0.2~100.0 μm ,为热力学不稳定的体系,在光学上容易浑浊或不透明。纳米乳剂的平均液滴半径为 50~200 nm,为热力学稳定的各向同性体系,趋于透明或略不透明纳米乳液被开发用于改善生物活性化合物的递送^[40]。

多元乳液是复杂的多分散体系,同时包含水包油乳液和油包水乳液。油包水乳液是最常见的多元乳液类型,由分散在连续水相中的大油滴中的小水滴组成。由于水和油腔的存在,多个乳剂可以同时包裹并递送亲水和亲脂的生物活性化合物。Won 等^[41]研究发现,在反应时间为 12 h,65 $^{\circ}\text{C}$ 下按质量比 1:1 混合牛奶分离蛋白和 κ -卡拉胶缀合物,并于 40 $^{\circ}\text{C}$ 下贮藏 2 d,可生成稳定的水包油乳液。Qiao 等^[42]制备了稳定的豌豆分离蛋白纳米颗粒水包油皮克林乳液凝胶,该凝胶可以吸附至液滴表面,并在周围的水相中形成 3D 网络,从而增强姜黄素的生物可利用性和稳定性。综上,蛋白质—多糖复合物已被应用于多种乳剂的稳定,由于其增强了所载化合物的包封效率、物理稳定性、保护和控释性能,具有较强的生物活性成分传递系统的潜力。

4 总结与展望

研究主要综述了植物蛋白—多糖复合物的制备、影响因素及功能特性,发现多糖和蛋白质种类繁多、制备方法多样,影响两者复合的因素也较多,形成的复合物种类及生物活性多种多样。因此,后续需更深入地研究其反应机制,将复合物进行准确的分类,并正确应用至适合领域。

参考文献

- [1] 兰秋雨,张清,刘琳,等.蛋白质糖基化改性方法和产物验证方法研究进展[J].食品与机械,2019,35(2):196-201.
LAN Q Y, ZHANG Q, LIU L, et al. Research progress of glycosylation modification methods and product verification methods in protein[J]. Food & Machinery, 2019, 35(2): 196-201.
- [2] 毕雅雯,刘晶,蒋艳,等.超声处理辅助大豆分离蛋白改善蛋黄乳化性[J].食品与生物技术学报,2022,41(1):60-67.
BI Y W, LIU J, JIANG Y, et al. Ultrasonic treatment assisted with soy protein isolate to improve the emulsification of egg yolk[J]. Journal of Food and Biotechnology, 2022, 41(1): 60-67.
- [3] 余帅朋,崔玥,王琳,等.多尺度蛋白质—多糖益生菌递送体系研究进展[J].食品工业科技,2023,44(17):470-482.
YU S P, CUI Y, WANG L, et al. Research progress of multi-scale protein-polysaccharide-based probiotic delivery system[J]. Food

- Industry Science and Technology, 2023, 44(17): 470-482.
- [4] JÉRÉMY C, EGGLE C, CARINE C, et al. Complex coacervation of pea protein isolate and tragacanth gum: Comparative study with commercial polysaccharides [J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2021, 69: 102641.
 - [5] MIN C, ZHANG C, CAO Y G, et al. Rheological, textural, and water-immobilizing properties of mung bean starch and flaxseed protein composite gels as potential dysphagia food: The effect of Astragalus polysaccharide [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 239: 124236.
 - [6] 陈旭, 赵华彬, 罗健伟, 等. 湿热处理对马铃薯淀粉—大豆肽复合物的理化和消化特性的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(7): 133-141.
 - CHEN X, ZHAO H B, LUO J W, et al. Effect of humid heat treatment on physicochemical and digestive characteristics of potato starch-soybean peptide complex[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(7): 133-141.
 - [7] CHANG C, WANG T, HU Q, et al. Caseinate-zein-polysaccharide complex nanoparticles as potential oral delivery vehicles for curcumin: Effect of polysaccharide type and chemical cross-linking [J]. Food Hydrocolloids, 2017, 72: 254-262.
 - [8] 吴周山, 李晨, 薛瑞, 等. 不同分子量的葡聚糖—花生分离蛋白接枝复合物的制备及其性质[J]. 食品工业科技, 2019, 40(1): 51-57.
 - WU Z S, LI C, XUE R, et al. Preparation and properties of dextran-peanut protein isolate graft complexes with different molecular weights[J]. Food Industry Science and Technology, 2019, 40(1): 51-57.
 - [9] 刘雪琼. 玉米醇溶蛋白—多糖纳米复合物的超声波制备技术及功能特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2021: 13-47.
 - LIU X Q. Study on ultrasonic preparation technology and functional characteristics of zein-polysaccharide nanocomposites [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2021: 13-47.
 - [10] TENG X X, ZHANG M, BENU A, et al. Garlic essential oil emulsions stabilized by microwave dry-heating induced protein-pectin conjugates and their application in controlling nitrite content in prepared vegetable dishes[J]. Food Hydrocolloids, 2023, 136: 108277.
 - [11] ZHANG J, DU H, MA N, et al. Effect of ionic strength and mixing ratio on complex coacervation of soy protein isolate/Flammulina velutipes polysaccharide[J]. Food Science and Human Wellness, 2023, 12(1): 183-191.
 - [12] LI G Y, CHEN Q H, SU C R, et al. Soy protein-polysaccharide complex coacervate under physical treatment: Effects of pH, ionic strength and polysaccharide type[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2021, 68: 102612.
 - [13] 林巍, 刘晓兰, 任健, 等. 3种还原糖对芸豆清蛋白糖基化改性产物乳化性及结构的影响[J]. 食品与机械, 2019, 35(10): 170-173.
 - LIN W, LIU X L, REN J, et al. Effects of three reducing sugars on emulsifying properties and structure of glycosylated modified kidney bean albumin [J]. Food & Machinery, 2019, 35(10): 170-173.
 - [14] 耿肖倩. 改性米渣蛋白—黄原胶相互作用及其复合物乳化性能的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022: 25-36.
 - GENG X Q. Study on the interaction between modified rice bran protein and xanthan gum and the emulsifying properties of its complex[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2022: 25-36.
 - [15] 皇甫云鹏, 包怡红, 赵鑫磊, 等. 大豆分离蛋白—单宁酸—多糖三元复合物的功能特性及结构表征[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(6): 37-51.
 - HUANGPU Y P, BAO Y H, ZHAO X L, et al. Functional characteristics and structural characterization of soybean protein isolate-tannin-polysaccharide ternary complex[J]. Journal of Food Science and Technology, 2022, 40(6): 37-51.
 - [16] MONTEIRO S R, LOPES-DA-SILVA J A. Effect of the molecular weight of a neutral polysaccharide on soy protein gelation[J]. Food Research International, 2017, 102: 14-24.
 - [17] XIAO Q, WO M W, HU J W, et al. The role of heating time on the characteristics, functional properties and antioxidant activity of enzyme-hydrolyzed rice proteins-glucose Maillard reaction products[J]. Food Bioscience, 2021, 43: 101225.
 - [18] GULDIKEN B, SAFFON M, NICKRESON M T, et al. Improving physical stability of pea protein-based emulsions near the isoelectric point via polysaccharide complexation [J]. Food Hydrocolloids, 2023, 145: 109029.
 - [19] RODRIGUES S A, PRADAL C, YU L, et al. Creating polysaccharide-protein complexes to control aqueous lubrication [J]. Food Hydrocolloids, 2021, 119: 106826.
 - [20] 王晓杰, 刘晓兰, 丛万锁, 等. 壳寡糖酶法糖基化修饰对玉米醇溶蛋白功能性质的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(8): 13-20.
 - WANG X J, LIU X L, CONG W S, et al. Effect of enzymatic glycosylation of chitosan oligosaccharide on functional properties of zein[J]. Food Science, 2018, 39(8): 13-20.
 - [21] 王胜男, 王冰冶, 赵贵兰, 等. 大豆乳清蛋白/大豆种皮多糖聚合物对高内相乳液稳定性的影响[J]. 中国食品学报, 2022, 22(8): 80-90.
 - WANG S N, WANG B Y, ZHAO G L, et al. Effect of soybean whey protein/soybean seed coat polysaccharide polymer on the stability of high internal phase emulsion [J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2022, 22(8): 80-90.
 - [22] WEN C T, ZHANG J X, QIN W, et al. Structure and functional properties of soy protein isolate-lentinan conjugates obtained in Maillard reaction by slit divergent ultrasonic assisted wet heating and the stability of oil-in-water emulsions [J]. Food Chemistry, 2020, 331: 127374.
 - [23] HAN X X, ZHAO Y L, MAO S N, et al. Effects of different

- amounts of corn silk polysaccharide on the structure and function of peanut protein isolate glycosylation products[J]. *Foods*, 2022, 11 (15): 2 214.
- [24] 张雪, 张震, 邹建, 等. 鹰嘴豆蛋白与卡拉胶互作体系表征及其功能性研究[J]. *食品科技*, 2020, 45(12): 245-250.
- ZHANG X, ZHANG Z, ZOU J, et al. Characterization of the interaction system between chickpea protein and carrageenan and its functional study[J]. *Food Science and Technology*, 2020, 45 (12): 245-250.
- [25] 朱颖, 吴隆坤, 贾有青, 等. 超声处理对黑豆蛋白与可溶性多糖复合物功能性性质及结构的影响[J]. *中国食品学报*, 2020, 20 (5): 181-186.
- ZHU Y, WU L K, JIA Y Q, et al. Effect of ultrasonic treatment on the functional properties and structure of the complex of black bean protein and soluble polysaccharide[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(5): 181-186.
- [26] 潘泓杉, 马高兴, 裴斐, 等. 金针菇多糖对大豆分离蛋白凝胶的增强作用及其结构表征[J]. *食品科学*, 2022, 43(20): 102-108.
- PAN H S, MA G X, PEI F, et al. Enhancement of flammulina velutipes polysaccharide on soy protein isolate gel and its structural characterization [J]. *Food Science*, 2022, 43 (20): 102-108.
- [27] 朱艳云. 基于银耳多糖的复配凝胶特性研究及其在果冻中的应用[D]. 南昌: 南昌大学, 2022: 102-116.
- ZHU Y Y. Study on the characteristics of compound gel based on tremella polysaccharide and its application in jelly[D]. Nanchang: Nanchang University, 2022: 102-116.
- [28] WANG W, SHEN M, LIU S, et al. Gel properties and interactions of Mesonablumes polysaccharide-soy protein isolates mixed gel: The effect of salt addition[J]. *Carbohydrate Polymers*, 2018, 192 (15): 193-201.
- [29] 侯芙蓉. 铁皮石斛多糖—黄原胶复合体系的凝胶特性及其应用研究[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2023: 9-36.
- HOU F R. Study on the gel properties and application of dendrobium candidum polysaccharide-xanthan gum complex system[D]. Shanghai: Universities of Applied Sciences, 2023: 9-36.
- [30] 汪少芸, 冯雅梅, 伍久林, 等. 蛋白质—多糖多尺度复合物结构的形成机制及其应用前景[J]. *食品科学*, 2021, 42(17): 1-9.
- WANG S Y, FENG Y M, WU J L, et al. Formation mechanism and application prospect of protein-polysaccharide multi-scale complex structure[J]. *Food Science*, 2021, 42(17): 1-9.
- [31] 陈龙, 陈晖, 朱静, 等. 茶多糖对海藻酸钠—淀粉—茶末复合膜性能的影响[J]. *食品与机械*, 2023, 39(10): 112-117.
- CHEN L, CHEN H, ZHU J, et al. Effect of tea polysaccharide on the properties of sodium alginate-starch-tea powder composite film [J]. *Food & Machinery*, 2023, 39(10): 112-117.
- [32] 梁洛丹, 曹伟伟, 李琳琳, 等. 蛋白质—多糖非共价及共价复合物包埋活性成分的研究进展[J]. *食品科学*, 2023, 44(21): 368-376.
- LIANG L D, CAO W W, LI L L, et al. Research progress of protein-polysaccharide noncovalent and covalent complexes embedding active ingredients[J]. *Food Science*, 2023, 44 (21): 368-376.
- [33] LI J Z, JIN W P, XU W, et al. Effect of charge density of polysaccharide on self-assembly behaviors of ovalbumin and sodium alginate [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2020, 154: 1 245-1 254.
- [34] HE W Y, TIAN L, ZHANG S S, et al. A novel method to prepare protein-polysaccharide conjugates with high grafting and low browning: Application in encapsulating curcumin[J]. *LWT*, 2021, 145: 111349.
- [35] XUE J Y, LUO Y C. Protein-polysaccharide nanocomplexes as nanocarriers for delivery of curcumin: A comprehensive review on preparation methods and encapsulation mechanisms[J]. *Journal of Future Foods*, 2023, 3(2): 99-114.
- [36] 王少卿, 牟鸣薇, 张博, 等. 复合水凝胶在食品中的应用研究进展[J]. *食品与机械*, 2022, 38(12): 212-217.
- WANG S Q, MOU M W, ZHANG B, et al. Research progress of composite hydrogels in food[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(12): 212-217.
- [37] FAN Z P, CHEN P, ZHANG P, et al. Rheological insight of polysaccharide/protein based hydrogels in recent food and biomedical fields: A review[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2022, 222: 1 642-1 664.
- [38] LIU K, CHEN Y Y, ZHA X Q, et al. Research progress on polysaccharide/protein hydrogels: Preparation method, functional property and application as delivery systems for bioactive ingredients[J]. *Food Research International*, 2021, 147: 110542.
- [39] WANG Y R, YANG Q, LISHA Y J, et al. Structural, gelation properties and microstructure of rice glutelin/sugar beet pectin composite gels: Effects of ionic strengths[J]. *Food Chemistry*, 2020, 346: 128956.
- [40] SUN X H, WANG H, LI S N, et al. Maillard-type protein-polysaccharide conjugates and electrostatic protein-polysaccharide complexes as delivery vehicles for food bioactive ingredients: Formation, types, and applications[J]. *Gels*, 2022, 8(2): 135.
- [41] WON S C, BYOUNGSEUNG Y. Preparation of milk protein isolate/ κ -carrageenan conjugates by Maillard reaction in wet-heating system and their application to stabilization of oil-in-water emulsions[J]. *LWT*, 2021, 139: 110542.
- [42] QIAO X, LIU F D, KONG Z H, et al. Pickering emulsion gel stabilized by pea protein nanoparticle induced by heat-assisted pH-shifting for curcumin delivery[J]. *Journal of Food Engineering*, 2023, 350: 111504.