



大豆蛋白薄膜改性技术研究进展

张友朋¹, 刘玉升²

(1. 山东农业大学 社会合作与成果转化处, 山东 泰安 271018; 2. 山东农业大学 植物保护学院, 山东 泰安 271018)

摘要:大豆蛋白膜因其无污染、可生物降解、来源广泛及透气性低等优点,成为当前的研究重点。但其抗拉强度低、延伸率较差且易导致细菌滋生,致使其应用受到严重影响。因此需要对大豆蛋白薄膜进行改性,以适应不同的用途。本文介绍了用于提高大豆蛋白使用性能的薄膜物理改性、纳米材料改性、化学改性、混合改性、酶法改性等改性方法,总结目前大豆蛋白薄膜的主要应用领域和需要解决的问题,并展望其发展方向。

关键词:大豆蛋白薄膜;物理改性;纳米材料改性;化学改性;混合改性;酶法改性;进展;应用

Research Progress on Modification Technology of Soy Protein Film

ZHANG You-peng¹, LIU Yu-sheng²

(1. Office of Social Cooperation and Achievement Transformation, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China; 2. College of Plant Protection, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China)

Abstract: Soy protein film has become the current research focus due to its non-polluting, biodegradable and low air permeability advantages. But its low tensile strength, poor elongation and prone bacterial growth cause its application has been severely compromised. Therefore, it is necessary to modify the film of soy protein. This article introduced the physical modification, nanomaterial modification, core modification, hybrid modification and enzymatic modification of soybean protein film to improve its performance. We also summarized the main application fields of soy protein films, the existing problems, and look forward to its development direction.

Keywords: Soybean protein film; Physical modification; Nanomaterial modification; Chemical modification; Hybrid modification; Enzymatic modification; Progress; Application

随着经济的不断发展,以煤、石油、天然气为原料制备高分子薄膜(聚乙烯、聚丙烯、聚苯乙烯等)的大量使用造成十分严重的生态破坏和环境污染^[1]。据不完全统计,现阶段我国每年废弃的塑料超过1 500万 t,且总量还在持续增长,此类材料不可再生且难以降解^[2]。为了解决这一生态难题,节约石化燃料的消耗并降低污染,大力研究和开发可再生、可降解的天然高分子生物质材料已经成为各国政府和学者关注的热点^[3]。

大豆是一种广泛种植的农作物,与其他可完全生物降解的天然高分子材料相比,大豆蛋白具有质优价廉、来源丰富、成模性良好以及易化学修饰等优点,成为了近年来制备薄膜材料、改善食品结构以及发展新食品的理想原料^[4],广泛应用于医药、化工、食品和涂料等行业^[5]。但大豆蛋白在使用过程中也存在诸多缺陷,难以满足现代工业的需求。与传统的合成高分子薄膜材料相比,大豆蛋白薄膜机械强度较低、抗拉强度不强、耐水性差并且容易导致细菌增生,严重限制其使用范围^[6-8]。为使大豆蛋白薄膜满足现代工业的要求,从而提高大豆制品的综合性能,研究者采用各种方式和方法来改变

其性质,人为对蛋白质结构进行修饰来改善大豆蛋白制品在生产、加工、使用过程中的理化性质,通常可采用掺杂、改性等技术制备复合薄膜以提高其机械强度和抗拉强度^[9-11]。常见的改性方法有物理改性、化学改性、纳米改性、酶法改性以及混合改性等^[12-13]。本文综述了提高大豆蛋白薄膜综合性能的改性方法,总结亟需解决的问题并展望其今后的发展方向。

1 大豆蛋白薄膜改性方法

1.1 物理改性

物理改性由于具有费用低、时间短、毒性小等优点,被广泛应用于大豆蛋白改性中,常见的改性方法有热处理改性、加压改性、辐射改性等处理技术^[14]。

1.1.1 热处理改性 适当的热处理可以提高大豆蛋白的表面活性、乳化性能以及交联程度,使其在结构上更有序、更稳定,但是过高的温度及加热时间的延长,可能会导致大豆蛋白质分子过度变性、分子之间发生断链,破坏其延伸率以及最大拉伸应力,影响其使用性能。Wu 等^[15]将 12%、15% 和

18%的蛋白质溶液分别加热 0.5、1.0 和 2.0 h,制备热诱导的大豆蛋白薄膜。研究结果表明,大豆蛋白薄膜中加热不同时间的依赖性释放符合非克第二定律。增加的蛋白质浓度或加热时间会导致非网络蛋白质的扩散系数降低,随着蛋白质浓度或加热时间的增加,幂律表达式指数移至更高的值,非网络蛋白质扩散系数与分子量之间关系密切,表明随着加热时间延长所形成的凝胶结构更紧密。

Liang 等^[16]研究了热处理和胃蛋白酶控制的酶水解相结合改性大豆蛋白薄膜的性能。尽管在大豆蛋白分离物水解之前进行高于 65 ℃ 的热处理会提高水解程度,但随着温度的升高,水解产物中较大的蛋白聚集体比例会提高其起泡能力和稳定性,从而导致其较低的储能模量,与 55 ℃ 的预处理相比,其吸附层更少,表面多余浓度更低,泡沫容量和稳定性差。

1.1.2 高压改性 超高压加工技术能够在瞬间将压力传达到大豆蛋白的各个部位,此法具有处理过程简单、能耗少、不会破坏原有风味等优点,是一种安全、有效地处理大豆蛋白薄膜的方法。因此,研究超高压技术对于大豆蛋白薄膜结构的变化具有重要的指导意义。

毕会敏等^[17]研究结果表明,高压处理后大豆蛋白质的水化作用增强,薄膜的热水速溶率增加,薄膜放置 48 h 后均保持良好的透明性和均匀性。当压力达到 400 MPa 时,薄膜的抗张强度增加 44%,透氧率下降 52.2%,断裂伸长率下降 25%,继续增加压力后,其性能趋于平缓,因此最佳的处理压力为 400 MPa。苏丹等^[18]研究结果表明超高压(400 ~ 600 MPa)技术能够使大豆蛋白的巯基含水量和表面疏水性能提高。

1.1.3 辐射改性 微波改性是辐射改性的一种,可以增加蛋白质分子热运动的频率,增加分子之间的摩擦,从而达到改变蛋白膜机械性能的效果。李帅等^[19]利用微波技术对可食膜进行物理改性,研究成膜材料配比、微波功率和微波时间对可食膜断裂伸长率、抗拉强度、水蒸气透过系数的影响,结果表明, $m(\text{SPI}):m(\text{CS})=1.69:1$,微波功率 222 W,微波 9.06 min, SPI/CS 可食膜各项性能较好,抗拉强度为 21.32 MPa,断裂伸长率为 27.12%,水蒸气透过系数为 $0.59 \times 10^{-12} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ 。可食膜机械性能显著增加,膜的阻水性能也得到提高。Wang 等^[20]以大豆蛋白和麦芽糖为原料制备 γ 射线处理的糖基化大豆蛋白薄膜,结果显示大豆蛋白与麦芽糖之间发生了美拉德反应,反应产物的结构发生了变化。当辐照剂量为 7.5 kGy 时,与对照组相比,改

性产物的机械性能提高了 $(23 \pm 0.21)\%$,与其他改进方法相比,辐照技术具有作用时间短,效率高,成本低的优点,更重要的是该技术在工业化生产中易于实施。

研究表明超声辅助离子液体可能是一种有效的改性大豆蛋白薄膜的辐射改性方法。Huang 等^[21]针对超声波及多种离子液体对大豆蛋白薄膜聚集行为影响的结果表明,阳离子或阴离子的变化会改变离子液体的物理化学性质,进而影响大豆蛋白薄膜的溶解度及聚集行为。高浓度的离子液体导致形成不溶性聚集体,从而导致溶解度降低。在大多数情况下,超声预处理对大豆蛋白薄膜的溶解度和聚集有很大影响。在超声和离子液体处理后,大豆蛋白薄膜的结构重新折叠并重新聚集。 $1 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ 1-丁基-2,3-二甲基咪唑鎓氯化物([BDMIM] Cl)和超声联合处理后,大豆蛋白薄膜的溶解度与单次超声和[BDMIM] Cl 处理相比显著提高。超声和 $1 \text{ mg} \cdot \text{mL}^{-1}$ [BDMIM] Cl 预处理相结合显示出改变 SPI 微观结构的协同作用。

1.2 纳米材料改性

纳米粒子是材料领域的热点方向之一,因其具有表面效应、小尺寸效应和宏观量子隧道效应等特点,被广泛应用于国民经济各个行业。因此,有必要采用纳米粒子对大豆蛋白薄膜进行改性,制备出抗菌、强度、稳定性等都大大增强的改性大豆蛋白薄膜^[22-23]。尹国平等^[24]研究结果表明,纳米 SiO_2 量、分散剂量和酸碱性对大豆蛋白薄膜的性能均有影响。当加入 1.0% (占大豆蛋白和 PVA 干重) 的 SiO_2 纳米粒子,1.5% 的聚乙烯基吡咯烷酮, pH4.0 时,复合薄膜的综合性能最好,拉伸强度为 9.71 MPa,断裂伸长率为 89.86%,透光率为 25.07%,吸水率为 48.35%。纳米 SiO_2 可以增强大豆蛋白/聚乙烯醇(PVA)复合薄膜的综合性能。

Qin 等^[25]采用纤维素纳米纤维(CNF)和纳米二氧化硅(NS)协同增强大豆蛋白,开发出一种生物基纳米复合材料改性大豆蛋白薄膜。CNF/NS 纳米杂化物通过共价和氢键相互作用与大豆蛋白基质具有优异的粘附性。将 CNF / NS 集成到大豆蛋白中,得到的纳米复合膜的拉伸强度(6.65 MPa)有所提高,比原始大豆蛋白薄膜增加 90.54%。而且,与未改性薄膜相比,所得复合薄膜具有显著降低的水蒸气渗透性和更大的水接触角度(91.75°),因此生物基复合材料协同增效的策略可能会成为一种应用前景较广的绿色方法。Chen 等^[26]采用纳米纤维素对大豆蛋白进行改性,得到纳米纤维素增强大豆蛋白薄膜。纳米纤维素/大豆蛋白界面处发生强界

面相互作用,在大豆蛋白基质中掺入20%的纳米纤维素导致机械强度和杨氏模量分别是纯大豆蛋白膜的14倍和7倍,在700 nm处的透光率超过75%。但纳米纤维素复合膜的吸水率比之前降低了80%。纳米材料与大豆蛋白结合,表现出良好的综合性能,能够弥补其各种缺陷,为丰富其应用领域奠定理论基础,是未来新产品研究与开发中值得关注的一个重要方面。

1.3 化学改性

化学改性技术不仅符合绿色、环境友好的要求,也为大豆蛋白的深加工提供一条有效的途径,因此有必要开展深入研究^[27]。Feng等^[28]在水溶液中以过硫酸铵(APS)为引发剂制备了大豆蛋白接枝丙烯酸酯(SGA)共聚薄膜。丙烯酸酯接枝后,大豆蛋白薄膜的玻璃化转变温度降低至35℃。膜的弹性模量从0.317 MPa增至46.949 MPa,断裂伸长率从453.133%降至187.125%。刘杰等^[29]采用聚乙二醇单甲醚与大豆蛋白之间发生席夫碱反应,然后通过NaBH₄还原将聚乙二醇成功接枝到大豆蛋白上,成功制备出大豆蛋白薄膜。经过聚乙二醇改性的大豆分离蛋白可以在37℃自发形成凝胶,且随着聚乙二醇接枝率的增加,凝胶时间可以缩短至30 min以内。张彬等^[30]研究了不同含量的肉桂醛对大豆蛋白薄膜性能的影响及其抑菌活性,当大豆蛋白膜中肉桂醛含量为3%时,能完全抑制大肠杆菌的生长,当其含量为4%时能完全抑制金黄色葡萄球菌和气假单胞菌的生长,当其含量为2%时即能抑制酵母菌的生长;且肉桂醛含量为6%,冷藏温度为4℃时,大豆蛋白膜能明显提高冷鲜猪肉的保鲜效果。说明肉桂醛的含量对大豆蛋白膜的水溶性、水蒸气透过系数、抗拉强度和断裂伸长率均有一定影响。经过化学改性以后,大豆蛋白薄膜的疏水性能、可塑性以及力学性能均得到明显的提升,是一种有效提高其性能的方法。

1.4 混合改性

Ma等^[31]选择柑桔果胶和苹果果胶作为接枝多糖共混制备出大豆蛋白/果胶共混薄膜。尽管两个果胶的甲氧基化和乙酰化程度相似,但苹果果胶的结构却比柑橘果胶复杂得多,分子量增加了2.20倍,并且侧链数量很多。在控制的干热条件下,柑橘和苹果果胶的接枝率分别为25.00%和21.85%。由于果胶具有很强的空间抑制作用,大豆蛋白薄膜的荧光强度和表面疏水性在美拉德反应后显著降低。然而,大豆蛋白薄膜的溶解性和乳化性能均得到显著改善。两种果胶样品均在大豆蛋白薄膜修饰中发挥了有利作用。

Cao等^[32]采用明胶与大豆蛋白混合,制备出大豆蛋白/明胶共混薄膜,大豆蛋白/明胶共混薄膜的融溶性能和机械性能都表现较好,且复合膜阻隔性能和机械性能随着明胶添加比率的增加而增强。当m(明胶):m(大豆蛋白)=4:6时其机械性能最好,且该膜比明胶膜更加经济。

1.5 酶法改性

酶法改性就是通过生物酶进行交联或降解蛋白质,从而改变蛋白质的功能,是一种有效地提高大豆蛋白应用价值的方法^[33-35]。Ding等^[36]研究表明,与未处理的大豆蛋白薄膜相比,谷氨酰胺转移酶(TG)交联的大豆蛋白薄膜溶解度明显降低。TG催化大豆蛋白薄膜展开组成型多肽,从而产生更随机的二级结构。超声预处理与未处理的大豆蛋白薄膜相比,交联的大豆蛋白薄膜的溶解度从41.80%升高到54.42%,乳化活性指数从45.82 m²·g⁻¹升高到64.10 m²·g⁻¹,发泡能力从31.81%提高到44.23%,大豆蛋白薄膜的巯基含量和表面疏水性增加。超声和TG处理相结合可能是大豆蛋白薄膜功能改性的有效方法。Yu等^[37]以大豆蛋白薄膜为底物,通过使用复合酶(风味蛋白酶、中性蛋白酶、碱性酶和转谷氨酰胺酶)酶解,然后通过TG酶交联,探索最合适的修饰条件,以获得兼具溶解性和可降解性的大豆蛋白薄膜产品。研究得出最佳大豆蛋白薄膜强度条件为风味蛋白酶:中性蛋白酶:碱性酶=1:1:2,pH7,酶解温度45℃,酶解时间30 min。产物的机械强度为35.45 g,与对照相比下降5.33%。溶解度为36.24%,与对照相比增加了54.01%。因此,酶法改性是实现大豆蛋白功能化、提高应用价值的有效途径之一,但其存在水解时间长、酶利用低等缺点,一直是其改性应用的瓶颈。

2 大豆蛋白薄膜应用前景

不同的改性技术可以促进大豆蛋白薄膜在食品工业多个方面的应用。热处理和胃蛋白酶控制的酶水解相结合能够改性大豆蛋白薄膜的性能,为其在具有起泡特性的充气食品中的应用奠定基础^[16]。大豆蛋白薄膜经微波技术物理改性可制成可食膜^[19],以大豆蛋白和麦芽糖为原料经γ射线处理可制得糖基化大豆蛋白薄膜^[20],在碱性条件下,以二醛淀粉浇铸大豆蛋白制备出淀粉改性的大豆蛋白复合薄膜^[38],这些研究结果有望应用在食品工业中。改性后的大豆蛋白薄膜可在多种食品系统中作为一种新型功能成分得到应用。超声和TG处理相结合将有利于优化大豆蛋白薄膜的结构和功能^[36]。支雅雯等^[39]在大豆蛋白中添加增塑剂,制

备出具有一定机械性能的改性大豆蛋白薄膜,其抗拉强度稳定性提高了64%,断裂延伸率稳定性提高了65%,水蒸气透过率稳定性提高了27%,对水的稳定性提高了20%,能够应用于食品包装等方面。郭宽等^[40]采用蜂蜡和甘油对大豆蛋白进行改性,改善大豆蛋白膜的机械性能和接触面积,从而使其阻水性能提高,同时可以防止养分流失,延长保质期,可很好地应用于涂膜保鲜行业,大大降低新鲜水果在运输过程中的腐烂率。

此外,大豆蛋白膜及其改性技术也有望在其他领域得到应用。采用明胶与大豆蛋白混合制备出的大豆蛋白/明胶共混薄膜比明胶膜更经济,可以在绿色环保的包装材料中广泛应用^[32]。改性的大豆蛋白薄膜溶解物总量减少了50%,在水中抗击穿能力降至20%以下,因此可以改善其在预想的包装和覆盖应用中的功能,能有效地应用于农用地膜方面。经过该乙二醇改性的大豆蛋白薄膜有望成为一种可注射型水凝胶,在生物医药领域具有相当广泛的应用前景^[29]。

3 问题和展望

大豆蛋白来源丰富、结构复杂,包含多种功能成分,是一类具有广阔应用前景的物质,其研究备受关注。然而大豆蛋白薄膜在使用过程中,与石油基高分子材料相比,存在机械强度低、抗拉强度不强、耐水性差,容易导致细菌增生等问题,同时我国在大豆蛋白薄膜方面的研究与国外还有一定的差距。目前,对大豆蛋白薄膜采用掺杂、改性等技术生产出多功能、专用性强的产品,已经成为其研究的重点方向。大豆蛋白薄膜,是一种廉价、可再生和可降解、能够取代石油基塑料的产品,其改性方法有很多,各种方法的优缺点不尽相同。随着人们对大豆蛋白薄膜研究的逐渐深入,人们对环境、能源和资源的关注提高,为满足不同用途对大豆蛋白薄膜的要求,其综合性能将得到不断提高,其应用领域也会不断得到开拓。

参考文献

[1] 汪洲,徐淑艳,孙巧歌,等. 大豆分离蛋白膜制备及改性研究的现状和应用[J]. 包装工程, 2020, 41(11): 119-126. (Wang Z, Xu S Y, Sun Q G, et al. Current situation and application of preparation and modification of soy protein isolate film[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(11): 119-126.)

[2] 王莺颖,郭兴凤. 大豆蛋白复合膜研究进展[J]. 中国油脂, 2017, 42(7): 34-38. (Wang Y Y, Guo X F. Research progress of soybean protein composite film[J]. China Oils and Fats, 2017, 42(7): 34-38.)

[3] 杜会云. 酶改性大豆分离蛋白抑菌膜的制备及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2011. (Du H Y. Preparation and performance study of enzyme-modified soybean protein isolate antibacterial film [D]. Changchun: Jilin University, 2011.)

[4] Wang Y, Wang Q, Zhu Y, et al. Structure and properties of oxycellulose fabric crosslinked with soy protein[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 257: 117548-117556.

[5] 杨光胜,陈复生,张丽芬,等. 大豆蛋白改性技术研究进展[J]. 粮食与油脂, 2013, 26(11): 1-3. (Yang G S, Chen F S, Zhang L F, et al. Research progress in modification technology of soybean protein[J]. Cereals & Oils, 2013, 26(11): 1-3.)

[6] Zhang Q Z, Cheng Z Z, Zhang J H, et al. Atmospheric cold plasma treatment of soybean protein isolate: Insights into the structural, physicochemical, and allergenic characteristics[J]. Journal of Food Science, 2020, 86(1): 68-77.

[7] Ma W C, Wang T, Wang J W, et al. Enhancing the thermal stability of soy proteins by preheat treatment at lower protein concentration[J]. Food Chemistry, 2020, 42(11): 306-314.

[8] 孙嘉临,袁玉娇,曾涣煌,等. 基于大豆分离蛋白的环境友好型包装材料研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(24): 269-276. (Sun J L, Yuan Y J, Zeng H H, et al. Research progress of environmentally friendly packaging materials based on soybean protein isolate[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(24): 269-276.)

[9] 郭永,李党生. 大豆蛋白改性及其在食品工业中的应用[J]. 食品研究与开发, 2011, 32(8): 186-189. (Guo Y, Li D S. Modification of soybean protein and its application in food industry [J]. Food Research and Development, 2011, 32(8): 186-189.)

[10] 陈敏智,周晓燕,陈燕. 纳米改性大豆蛋白基复合材料研究进展[J]. 林业科技开发, 2015, 29(6): 1-5. (Chen M Z, Zhou X Y, Chen Y. Research progress of nano-modified soybean protein-based composite materials [J]. Forestry Science and Technology Development, 2015, 29(6): 1-5.)

[11] 肖怀秋,李玉珍. 亚基改性及对大豆蛋白空间结构与功能特性影响研究进展[J]. 大豆科学, 2020, 39(6): 954-960. (Xiao H Q, Li Y Z. Research progress of subunit modification and its effect on spatial structure and functional properties of soybean protein[J]. Soybean Science, 2020, 39(6): 954-960.)

[12] Sabina G. Functional properties of soy protein isolate edible films as affected by rapeseed oil concentration[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 85: 233-241.

[13] 王晨,秦烨,王志平,等. 大豆分离蛋白膜改性研究进展[J]. 食品工业, 2019, 40(3): 244-248. (Wang C, Qin Y, Wang Z P, et al. Research progress on modification of soy protein isolate film[J]. Food Industry, 2019, 40(3): 244-248.)

[14] Konomi T, Hiroyuki S, Kazuto S, et al. The timing effects of soy protein intake on mice gut microbiota[J]. Nutrients, 2019, 12(1): 114-125.

[15] Wu C, Hua Y F, Chen Y M, et al. Release behavior of non-network proteins and its relationship to the structure of heat-induced soy protein gels[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(16): 4211-4219.

[16] Liang G J, Chen W P, Qie X J, et al. Modification of soy protein isolates using combined pre-heat treatment and controlled

- enzymatic hydrolysis for improving foaming properties [J]. Food Hydrocolloids, 2020(105): 105764.
- [17] 毕会敏, 马中苏, 闫革华, 等. 膜液的高压处理对大豆分离蛋白膜性能的影响[J]. 食品科学, 2004, 25(3): 49-51. (Bi H M, Ma Z S, Yan G H, et al. The effect of high pressure treatment of membrane solution on the performance of soybean protein isolate membrane[J]. Food Science, 2004, 25(3): 49-51.)
- [18] 苏丹, 李树君, 赵凤敏, 等. 超高压处理对大豆分离蛋白结构的影响[J]. 食品科技, 2009, 34(12): 51-55. (Su D, Li S J, Zhao F M, et al. The effect of ultra-high pressure treatment on the structure of soybean protein isolate [J]. Food Science and Technology, 2009, 34(12): 51-55.)
- [19] 李帅, 谷雨. 微波改性大豆分离蛋白/壳聚糖可食膜工艺优化研究[J]. 食品工业, 2019, 40(1): 147-151. (Li S, Gu Y. Study on the optimization of microwave modified soybean protein isolate/chitosan edible film[J]. Food Industry, 2019, 40(1): 147-151.)
- [20] Wang Y Y, Zhang A Q, Wang Y X, et al. Effects of irradiation on the structure and properties of glycosylated soybean proteins [J]. Food & Function, 2020, 11(2): 1635-1646.
- [21] Huang L R, Zhang W X, Yan D G, et al. Solubility and aggregation of soy protein isolate induced by different ionic liquids with the assistance of ultrasound [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2020, 164(1): 2277-2283.
- [22] Ahmed T, Hu T, Zhang Z, et al. Effect of different oils and ultrasound emulsification conditions on the physicochemical properties of emulsions stabilized by soy protein isolate [J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 49: 283-293.
- [23] Song C L, Ren J, Chen J P, et al. Effect of glycosylation and limited hydrolysis on structural and functional properties of soybean protein isolate [J]. Journal of Food Measurement and Characterization, 2018, 12(4): 2946-2954.
- [24] 尹国平, 陈志周, 刘冰. 纳米 SiO₂ 改性大豆蛋白/聚乙烯醇复合薄膜的研究[J]. 食品工业科技, 2013, 34(18): 110-113. (Yin G P, Chen Z Z, Liu B. Nano-SiO₂ modified soybean protein/polyvinyl alcohol composite film [J]. Science and Technology of Food Industry, 2013, 34(18): 110-113.)
- [25] Qin Z Y, Mo L T, Liao M R, et al. Preparation and characterization of soy protein isolate-based nanocomposite films with cellulose nanofibers and nano-silica *via* silane grafting[J]. Polymers, 2019, 11(11): 1835.
- [26] Chen G, Liu H. Electrospun cellulose nanofiber reinforced soybean protein isolate composite film [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2008, 110(2): 641-646.
- [27] 陈婷婷, 曹光群, 杨成. 聚乙二醇包覆的维生素 C 脂质体的制备及性质研究[J]. 大豆科学, 2008, 27(3): 505-508. (Chen T T, Cao G Q, Yang C. Preparation and properties of vitamin C liposomes coated with polyethylene glycol[J]. Soybean Science, 2008, 27(3): 505-508.)
- [28] Feng B, Wang D, Li Y H, et al. Mechanical properties of a Soy Protein Isolate-Grafted-Acrylate (SGA) copolymer used for wood coatings[J]. Polymers, 2020, 12(5): 114-120.
- [29] 刘杰, 周浩, 黄郁芳, 等. 聚乙二醇化学改性的大豆分离蛋白凝胶[J]. 高等学校化学学报, 2018, 39(2): 390-396. (Liu J, Zhou H, Huang Y F, et al. Polyethylene glycol chemically modified soy protein isolate gel[J]. Chemical Journal of Chinese Universities, 2018, 39(2): 390-396.)
- [30] 张彬, 江娟. 肉桂醛-大豆分离蛋白可食膜的抑菌及其对冷鲜猪肉的保鲜[J]. 食品科学, 2011, 32(S1): 106-112. (Zhang B, Jiang J. Bacteriostasis of cinnamaldehyde-soy protein isolate edible film and its preservation of chilled pork[J]. Food Science, 2011, 32(S1): 106-112.)
- [31] Ma X B, Chen W J, Yan T Y, et al. Comparison of citrus pectin and apple pectin in conjugation with soy protein isolate (SPI) under controlled dry-heating conditions [J]. Food Chemistry, 2020, 309: 125501.
- [32] Cao N, Fu Y, He J. Preparation and physical properties of soy protein isolate and gelatin composite films [J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(7): 1153-1162.
- [33] Shanise L H, Laura M F, Jarine A E, et al. Electrospun ultrafine fibers from black bean protein concentrates and polyvinyl alcohol [J]. Food Biophysics, 2019, 14(4): 446-455.
- [34] Shanesazzadeh E, Kadivar M, Milad F. Production and characterization of hydrophilic and hydrophobic sunflower protein isolate nanofibers by electrospinning method[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 119: 1-7.
- [35] 陈珊珊, 陶宏江, 王亚静, 等. 葵花籽壳纳米纤维素/壳聚糖/大豆分离蛋白可食膜制备工艺优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(8): 306-314. (Chen S S, Tao H J, Wang Y J, et al. Preparation process optimization of sunflower husk nanocellulose/chitosan/soy protein isolate edible film [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(8): 306-314.)
- [36] Ding X Y, Zeng N, Zhang G W, et al. Influence of transglutaminase-assisted ultrasound treatment on the structure and functional properties of soy protein isolate [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2019, 43(11): 1-15.
- [37] Yu L, Yan G Y, John B. Effects of complex enzymes modification on functional properties of soybean protein isolate based on orthogonal experiment [J]. Materials Science Forum, 2020, 60(38): 144-153.
- [38] Gennadios A, Weller C L, Cezeirat C, et al. Soy protein isolate-dialdehyde starch films[J]. Industrial Crops and Products, 1998(8): 195-203.
- [39] 支雅雯, 张华江, 王晓琪, 等. 不同增塑剂对大豆蛋白包装薄膜机械性能稳定性的影响[J]. 食品科学, 2018, 39(3): 245-251. (Zhi Y W, Zhang H J, Wang X Q, et al. Effects of different plasticizers on the mechanical stability of soy protein packaging films[J]. Food Science, 2018, 39(3): 245-251.)
- [40] 郭宽, 张超, 马越, 等. 蜂蜡和甘油含量对大豆蛋白膜机械性能和阻隔性能的影响[J]. 中国粮油学报, 2011, 26(4): 15-18. (Guo K, Zhang C, Ma Y, et al. Effects of beeswax and glycerin content on mechanical properties and barrier properties of soybean protein film[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2011, 26(4): 15-18.)