

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2014.02.004

# 大豆蛋白基生物降解材料研究进展

尹国平, 陈志周, 滑艳稳

(河北农业大学 食品科技学院, 河北 保定 071000)

**摘要:** 大豆蛋白材料的改性方法主要有物理改性、化学改性、酶法改性以及纳米共混改性等。对大豆蛋白材料的性能改善研究主要集中于薄膜材料的成膜性能、机械性能、吸水性能、透光性能、阻气性能和水蒸气透过性能、生物降解性能等方面。大豆蛋白基生物降解材料多被用作制备可食性薄膜, 应用于果蔬的涂抹保鲜及部分食品的内包装; 改性后的大豆蛋白可作为营养保健物质用作生物材料及生物医用材料。大豆蛋白基生物降解材料未来的发展方向主要为降低成本及增强性能等研究。

**关键词:** 大豆蛋白; 成膜性能; 机械性能; 吸水性能; 透光性能; 生物降解性能

**中图分类号:** TB484; TB332

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-7100(2014)02-0016-06

## Research Progress in Soy Protein-Based Biodegradable Materials

Yin Guoping, Chen Zhizhou, Hua Yanwen

(College of Food Science and Technology, Agriculture University of Hebei, Baoding Hebei 071000, China)

**Abstract:** The main modified methods of soy protein materials include physical modification, chemical modification, enzymic modification, nanocomposites modification. And the performance of soy protein materials study is mainly focused on improving their film-forming properties, mechanical properties, water absorption ability, light transmittance, gas barrier properties and water vapor permeability, biodegradability, etc. Soy protein-based biodegradable materials are usually used in the edible film, the preparation of fresh fruits and vegetables and the inner packaging of some food. Besides, the modified soy protein can be used as nutritional substances as bio-materials and bio-medical materials. The research of how to reduce costs and enhance performance will be the main future development direction of soy protein-based biodegradable materials.

**Key words:** soy protein; film-forming property; mechanical property; water absorption ability; light transmittance; biodegradability

## 0 引言

传统的以石油为主要原料的食品包装膜, 可降解性能较差, 给能源和环境带来了较大的负面效应。面临油气资源及煤资源逐步走向枯竭的威胁, 以欧

洲为首的各国政府均在积极准备, 在合理利用化石能源的同时, 加大对可再生能源的研究与开发, 以使未来人类赖以生存发展的材料逐步向可降解及可再生能源方向过渡<sup>[1-2]</sup>。

收稿日期: 2013-07-10

基金项目: 河北省科技计划基金资助项目(10225151)

作者简介: 尹国平(1986-), 女, 河北沧州人, 河北农业大学硕士生, 主要研究方向为食品包装材料与技术,

E-mail: yinguoping@yahoo.cn

通信作者: 陈志周(1970-), 男, 河北保定人, 河北农业大学教授, 主要从事食品包装方面的教学和研究,

E-mail: chenzhizhou2003@yahoo.com.cn

由于大豆蛋白分子侧链上具有活泼基团,因此可对大豆蛋白基材料进行改性,以提高其制品的性能。近90 a来,相关研究者们一直致力于大豆蛋白基材料的研究。20世纪初,法国和英国就发表了相关专利。1930年,爱迪生在美国研究院开发了一种添加大豆粉的酚醛树脂塑料<sup>[3-4]</sup>。第二次世界大战后期,由于石油价格迅速下降,高分子石油基材料得到迅猛发展,并控制了整个市场,大豆蛋白基材料的研究工作被搁置。20世纪末,在资源与环境的双重压力下,研究者们又将目光集中在大豆蛋白基可生物降解材料的开发利用上。本文主要介绍了大豆蛋白的成膜工艺,大豆蛋白材料性能优化的研究进展,以及大豆蛋白材料的应用现状,并对其作为可生物降解材料替代某些通用塑料的应用前景进行了展望。

## 1 大豆蛋白材料的改性方法

大豆蛋白分子含有酰胺键,脆性较大,不易加工成型,在加热条件下容易分解,限制了其应用。为了提高其性能及应用领域,在制备大豆蛋白热塑性材料时,必须对其进行改性。大豆蛋白分子具有独特的结构特征和相互作用,其侧链上含有丰富的活泼基团(如 $-NH_2$ ,  $-COOH$ ,  $-OH$ 等),可以通过多种改性反应,提高材料的使用性能。目前,应用于大豆蛋白的改性方法主要有物理改性、化学改性、酶法改性以及纳米共混改性等。

物理改性一般是利用加热、共混、加压、微波、辐照、高频电场、强烈振荡等物理方式,改变蛋白质的功能特性,一般不会破坏蛋白质的一级结构。物理改性具有成本较低、操作简单、无毒副作用、作用时间短、对可食性大豆材料的营养性能及安全性能影响较小等优点,但是相对而言,物理改性效率较低,专一性较差。Mrinal Pednekar等<sup>[5]</sup>将豆腐和豆浆中的大豆蛋白进行辐射处理,提高了大豆蛋白的溶解性能、乳化作用及凝胶化作用。

化学方法是通过引入化学试剂,与蛋白质分子中的功能基团进行化学反应,从而生成新的基团,或使原蛋白多肽链发生断裂、聚合,从而造成蛋白质分子空间结构、理化性质和功能特性的改变。化学改性具有效果显著、试剂选择性较广泛的优势,但其中某些有害残留物质难免会由包装材料迁移到包装内容物中,存在一定的安全隐患。陈志周等<sup>[6-7]</sup>研究了不同增强剂对大豆蛋白/聚乙烯醇复合薄膜性能的影响,发现其改性效果较明显。

酶法改性是利用某些蛋白酶的内、外切作用对蛋白分子进行切割,从而改变蛋白质的功能。相对而言,酶化学修饰具有专一性较强、安全和无毒等特点,但是由于酶的作用需要特殊的温度条件,因此使得加工工艺条件设置变得复杂化。吴进菊等<sup>[8]</sup>通过总结转谷氨酰胺酶对大豆蛋白等可食用膜改性研究的状况,提出转谷氨酰胺酶改性大豆蛋白食用膜商业化生产的可能性。

纳米改性是将纳米粒子与大豆蛋白直接共混或共熔,使纳米颗粒穿插到大豆蛋白基质中,从而使大豆蛋白复合材料具有纳米性能。纳米改性具有效率较高、操作简单、效果明显等特点。Lee J. E.等<sup>[9]</sup>和P. Kumar等<sup>[10]</sup>均采用纳米蒙脱土对大豆分离蛋白(soy protein isolate, SPI)进行改性,制备了纳米复合材料薄膜,结果发现,蒙脱土的加入可增加材料的机械性能和阻隔性能。

综上所述,各种改性方法各有其特点,作用原理也各不相同,对大豆蛋白塑料性能的影响程度也不相同。

## 2 大豆蛋白材料的性能改善

目前,对大豆蛋白材料的性能改善研究主要集中在薄膜材料的机械性能、吸水性能、透光性能、阻气性能和水蒸气透过性能、降解性能等方面。

### 2.1 成膜性能

大豆蛋白分子内部存在氢键、二硫键、离子键、疏水作用及偶极作用等化学键之间的相互作用,化学性质活跃,分子结构较不稳定,在外界物理处理(高温、搅拌、碱性、酸性、超声等作用)或某些化学试剂作用下,会发生分子间化学键的断裂,造成聚合物分子链的重新定向排列,使其疏水基团得以暴露,形成新的化学键或相互作用稳定的三维立体结构。目前,大豆蛋白基生物降解材料的加工方法主要有两种:一是湿法加工,即将处理后的大豆蛋白溶液在一定器具上流延成膜,然后加热烘干或自然晾干成型;另一种则是干法加工,即在低水分条件下,将改性处理后的大豆蛋白与一定量的助剂共混,使用适宜的模具,按照挤出一模压—注塑或吹塑—成型的流程加工而成。

在大豆蛋白薄膜制备工艺方面的研究中,张华江等<sup>[11]</sup>研究发现,当每100 mL膜液中加入的大豆分离蛋白质量、甘油质量、亚硫酸钠质量分别为4.0, 2.0和0.1 g,干燥温度为60 ℃,干燥时间为2 h时,大豆分离蛋白的成膜性能较好,其抗拉强度可达61.892 N,

H<sub>2</sub>O 透过速率为 16.204 mg/(cm<sup>2</sup>·d), O<sub>2</sub> 透过速率为 0.313 mg/(cm<sup>2</sup>·d), CO<sub>2</sub> 透过速率为 2.899 mg/(cm<sup>2</sup>·d)。Rakesh Kumar 等<sup>[12]</sup>通过研究硫二甘醇对大豆分离蛋白材料的增塑作用,发现相对于甘油而言,以质量分数为 25% 的硫二甘醇作为增塑剂的大豆蛋白材料具有较高的热稳定性和耐水性能。同时,其研究发现,以酸性媒介取代碱性环境,亦可成功制备大豆分离蛋白薄膜,因为酸性媒介可以促使大豆分离蛋白分子中的疏水基团扩散到蛋白质溶液的气液界面,使其表面张力减弱,因此酸性条件更有助于大豆分离蛋白薄膜的制备<sup>[13-14]</sup>。

## 2.2 机械性能

机械性能是蛋白质材料最重要的性能指标之一。为保证大豆蛋白薄膜作为包装材料能达到一定的使用寿命,必须提高材料的抗张强度和断裂伸长率等力学性能。K. D. Martinez 等<sup>[15]</sup>成功制备了大豆蛋白/聚乙烯醇复合材料,这种复合材料既具有蛋白质的特性,还具有聚乙烯醇的力学性能,可以用于食品包装、生物医学及工业纺织等领域。Tian Huafeng 等<sup>[16]</sup>通过比较三乙醇胺、二乙醇胺和甘油对大豆蛋白材料的增塑作用,发现当使用三乙醇胺作为增塑剂时,大豆蛋白材料具有较高的热稳定性和力学性能。Jia Dongying 等<sup>[17]</sup>对魔芋葡甘聚糖/壳聚糖/大豆分离蛋白三重复合薄膜进行了研究,结果表明,当葡甘聚糖与壳聚糖的添加质量之比为 1:1 时,随着大豆蛋白含量的增大,复合膜的机械性能降低;当蛋白含量一定时,随着葡甘聚糖含量的降低或壳聚糖含量的增大,薄膜的拉伸强度降低,断裂伸长率增大。

## 2.3 吸水性能

一定的吸水性能可以保证可生物降解材料的降解率,但是在潮湿环境下,大豆蛋白质材料的力学性能明显下降,因此,为保证材料的使用范围和途径,应尽量提高材料的耐水性能。张君红等<sup>[18]</sup>采用多亚甲基多苯基异氰酸酯(polyaryl polymethylene isocyanate, PAPI)改性大豆蛋白,并加入聚己内酯制备大豆蛋白复合材料。试验发现,随着 PAPI 含量的增加,大豆蛋白材料的 24 h 吸水率从 33.89% 下降到 9.77%。郝建淦等<sup>[19]</sup>用传统的热压成型方法,制备了大豆蛋白/玻纤复合材料,并对其性能进行了测试,测试结果表明,随着玻璃纤维加入量的增大,复合材料的吸水率逐渐降低,并最终接近 25%。何玲玲等<sup>[20]</sup>以甘油作为增塑剂,制备了大豆蛋白/聚乙烯醇复合薄膜,并对材料的吸水性能进行了测试。结果显示:聚乙烯醇对大豆蛋白材料的吸水性能有明显

的改善,24 h 吸水率由 85.5% 下降到 54%。

## 2.4 透光性能

薄膜材料的透光性能可以间接表示材料的透明性。与普通塑料薄膜相比,大豆蛋白薄膜的透明性较差,因此,提高蛋白材料的透明度可以扩大材料的应用范围。研究表明,对于共混材料而言,共混组分之间的相容性程度决定了材料透光率的大小<sup>[21]</sup>。本项目组前期分别采用了不同增强剂与还原剂,对大豆蛋白/聚乙烯醇复合薄膜进行改性<sup>[6-7]</sup>,结果表明:当选用的增强剂分别为可溶性淀粉、羧甲基纤维素钠和明胶时,薄膜的透光率由 14.80% 分别提高到 16.48%, 14.96% 及 17.60%; 而当选用的还原剂分别为抗坏血酸、半胱氨酸及亚硫酸钠时,复合薄膜的透光率分别为 16.22%, 18.50% 及 25.62%。这些试剂的加入均不同程度地增强了原材料的透光性能。

## 2.5 阻气性能和水蒸气透过性能

在大豆蛋白薄膜的实际应用中,一定的阻气性能可以有效阻止食品的新陈代谢,延缓食品的品质变化;材料的水蒸气透过系数越低,表示其阻水性能越好,薄膜的防腐效果越好<sup>[22]</sup>。Wu Ronglan 等<sup>[23]</sup>制备了纤维素/大豆蛋白质共混材料,结果发现,随着共混材料中纤维素含量的增加,共混材料的水蒸气透过率降低,且表现出对氧气和二氧化碳良好的阻隔性能。G. A. Denavi<sup>[24]</sup>制备了大豆蛋白/鳄皮明胶的共混膜,发现随着蛋白质含量的增加,共混膜表现出较好的水蒸气阻隔性能。F. María Monedero 等<sup>[25]</sup>探讨了油酸和蜂蜡对大豆分离蛋白薄膜性能的影响。结果表明:脂质与蛋白比例和蜂蜡在脂质中所占比例的变化对膜的水蒸气透过系数值影响不大,但加入脂质可以显著降低薄膜的水蒸气透过系数值。祝贝贝等<sup>[26]</sup>利用光催化技术,制备了 TiO<sub>2</sub>/大豆分离蛋白。结果显示:复合膜的最佳工艺条件为每 150 mL 膜液中加入的 TiO<sub>2</sub> 质量、甘油质量及大豆分离蛋白质量分别为 2.00, 3.75 和 4.50 g,此时,复合薄膜的水蒸气透过系数为 5.19 mm/(m<sup>2</sup>·d·kPa), O<sub>2</sub> 透过速率为 0.12 mg/(cm<sup>2</sup>·d), CO<sub>2</sub> 透过速率为 11.82 mg/(cm<sup>2</sup>·d), 复合材料具有一定替代塑料材料的性能。

## 2.6 生物降解性能

生物降解性能是天然高分子材料的重要性能之一,该性能保证了其材料废弃物不会污染环境。因为蛋白质沿着肽链并不存在同等的重复单元,所以在适宜的温湿度及氧气环境下可以迅速降解<sup>[27]</sup>。Li Yidong 等<sup>[28]</sup>制备了大豆分离蛋白与聚丁二酸丁二醇酯(poly butylenes succinate, PBS)共混材料,结果发现,这种共混材料具有良好的降解性能,并且降

解速度可通过改变PBS的结构和含量来调节。苏峻峰<sup>[29]</sup>研究了SPI/聚乙烯醇(polyvinyl alcohol, PVA)复合薄膜光降解行为及有氧降解行为。结果显示:与原SPI薄膜相比,高分子之间的氢键及交联链缠结结构,在一定程度上会抑制微生物的生长及小分子气体在材料中的传递,因而限制了微生物对SPI薄膜的分解利用速率;此外,SPI含量对SPI/PVA共混物的生物降解行为影响较大,增塑剂的添加对其降解行为几乎没有影响。贾芸芝<sup>[30]</sup>通过土埋降解法,检测了助剂改性前及改性后大豆蛋白/聚乙烯醇薄膜的降解性能,结果发现,无论是在室内恒温恒湿环境下,还是在室外自然环境下,第131 d时,各种薄膜的降解失重率均在65%以上,满足国家对降解材料的降解率要求。

### 3 大豆蛋白材料的应用现状

大豆蛋白因具有成膜性能、阻隔性能、可食性及丰富的营养成分,可以有效地阻止果蔬水分的流失及因新陈代谢带来的果蔬营养成分的损失,因此多被用来制备可食性薄膜,应用于果蔬的涂抹保鲜及部分食品的内包装<sup>[31]</sup>。夏明涛等<sup>[32]</sup>采用大豆分离蛋白制备可食性膜,并将膜液涂于花生表面,于65℃条件下贮藏25 d后发现,与空白对照组相比,裹衣花生过氧化值的生成量下降了20%。张赟彬等<sup>[33]</sup>以大豆分离蛋白为主要原料并添加助剂,制备了可食性薄膜,并将其应用于猪肉的保鲜。结果表明,此可食性膜能有效降低冷藏过程中猪肉的失水率、挥发性盐基氮含量、大肠菌群数以及菌落总数。刘开华等<sup>[34]</sup>将茶多酚加入大豆分离蛋白中,制备复合涂膜,并应用于甜樱桃的保鲜包装,成功地将甜樱桃的室温保鲜期由2 d延长到8 d。

大豆蛋白经改性后,可用于制备大豆蛋白基黏合剂及大豆蛋白纤维材料,并可作为营养保健物质用作生物材料。大豆蛋白基黏结剂具有绿色环保、安全可靠、成本较低和使用方便等优点,可用作室内装饰材料的黏结。Sun Shaomin等<sup>[35]</sup>将大豆粉与酪素共混,制备黏结剂,并将其应用于生产碎麦秆粒板材。目前研究的大豆蛋白纤维实际上为大豆蛋白/聚乙烯醇共混纤维,其中,聚乙烯醇的质量分数占80%左右。曹机良等<sup>[36]</sup>制备了大豆蛋白/牛奶/聚乙烯醇共混纤维,并以大豆蛋白/聚乙烯醇纤维作为对照,研究了酸性染料对此两种蛋白纤维的吸附能力。结果发现,染料在前者的平衡吸附量高于后者。

近年来,大豆蛋白材料作为生物医用材料的研

究备受关注。Song Fei等<sup>[37]</sup>通过采用氧化海藻酸钠对大豆分离蛋白进行化学改性,制备了水凝胶,并模拟了在人体胃肠道环境中,凝胶对5-氨基水杨酸的释放规律。结果发现,药物的释放规律符合Fick扩散机理,即酸性条件下的释放率低于中性条件下的释放率。此外,大豆蛋白还可以与纤维素须晶、高岭石等材料共混制备塑料片材,其力学性能与普通塑料相仿,应用范围较广泛<sup>[38-39]</sup>。

### 4 问题与展望

大豆蛋白基可生物降解材料可以减少环境污染,缓解能源危机,对生态平衡及资源的可持续发展意义较大。经改性,大豆蛋白材料可以制成功能薄膜、各种器具、餐具及日用品等,在农业用薄膜、日用品及生物医药等领域广泛应用。但是,与传统的石油基热塑性材料相比,仍存在加工成本较高、性能不够好及稳定性较差等问题。另外,大豆蛋白基可生物降解材料的降解机理和降解评价也没有形成统一的标准,因而极大地限制了其推广和应用。在降低成本方面,应研发价格低廉、合成高效的高分子聚合物的合成方法,进一步研究大豆蛋白的改性及加工方法;在增强性能方面,就如何提高蛋白质的分离和改性效率,增强改性的针对性及安全性,制备功能特性优异的专用大豆蛋白系列材料是未来的研究方向。

随着研究的不断深入,通过对大豆蛋白降解材料进行改性,并添加相应的助剂,建立材料制备工艺的数学模型,有望研制出与石油基塑料膜具有相同甚至更高应用性能的可降解薄膜,并实现工业化生产。

#### 参考文献:

- [1] 尹国平,滑艳稳,陈志周. 纳米SiO<sub>2</sub>改性可生物降解材料研究进展[J]. 包装学报, 2013, 5(4): 15-19.  
Yin Guoping, Hua Yanwen, Chen Zhizhou. Research Progress on Biodegradable Materials Modified by Nano-SiO<sub>2</sub>[J]. Packaging Journal, 2013, 5(4): 15-19.
- [2] 尹国平,陈志周,张琳. 天然高分子/PVA可生物降解材料研究[J]. 包装学报, 2013, 5(3): 20-24.  
Yin Guoping, Chen Zhizhou, Zhang Lin. Research on Natural Polymer/PVA Biodegradable Materials[J]. Packaging Journal, 2013, 5(3): 20-24.
- [3] Erickson D R. Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization[M]. St. Louis, Missouri: Aocs Press and United Soybean Board, 1993: 387-391.

- [4] Myers D J. Industrial Applications for Soy Protein and Potential for Increased Utilization[J]. *Cereal Foods World*, 1993, 38(5): 355-360.
- [5] Mrinal Pednekar, Amit K Das, Rajalakshmi V, et al. Radiation Processing and Functional Properties of Soybean [J]. *Radiation Physics and Chemistry*, 2010, 79: 491-494.
- [6] 陈志周, 贾云芝, 于志彬. 增强剂对大豆蛋白/聚乙烯醇复合薄膜性能的影响[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(13): 291-293.  
Chen Zhizhou, Jia Yunzhi, Yu Zhibin. Effect of Intensifier on the Properties of Soy Protein/Polyvinyl Alcohol Film [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2012, 33(13): 291-293.
- [7] 贾云芝, 陈志周. 还原剂对大豆蛋白/聚乙烯醇复合薄膜性能的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(增刊1): 312-316.  
Jia Yunzhi, Chen Zhizhou. Effects of Reducing Agents on Common Properties of Soy Protein/Polyvinyl Alcohol Films [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(S1): 312-316.
- [8] 吴进菊, 于博, 豁银强, 等. 转谷氨酰胺酶改性可食用膜的研究进展[J]. *食品研究与开发*, 2013, 34(4): 114-117.  
Wu Jinju, Yu Bo, Huo Yinqiang, et al. Research Progresses on Modification of Edible Films by Transglutaminase[J]. *Food Research and Development*, 2013, 34(4): 114-117.
- [9] Lee J E, Kim K M. Characteristics of Soy Protein Isolate-Montmorillonite Composite Films[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2010, 118(4): 2257-2263.
- [10] Kumar P, Sandeep K P, Alavi S, et al. Preparation and Characterization of Bio-Nanocomposite Films Based on Soy Protein Isolate and Montmorillonite Using Melt Extrusion [J]. *Journal of Food Engineering*, 2010, 100: 480-489.
- [11] 张华江, 迟玉杰, 孙波, 等. 大豆分离蛋白食品包装薄膜的制备条件研究[J]. *食品科学*, 2010, 31(4): 280-285.  
Zhang Huajiang, Chi Yujie, Sun Bo, et al. Preparation of Soy Protein Isolate-Based Food Packaging Films[J]. *Food & Science*, 2010, 31(4): 280-285.
- [12] Kumar Rakesh, Wang Linxiang, Zhang Lina. Structure and Mechanical Properties of Soy Protein Materials Plasticized by Thiodiglycol[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 111(2): 970-977.
- [13] Ventureira J L, Martínez E N, Añón M C. Effect of Acid Treatment on Structural and Foaming Properties of Soy Amaranth Protein Mixtures[J]. *Food Hydrocolloids*, 2012, 29(2): 272-279.
- [14] Ru Z-Henestrosa V P, Sánchez C C, Pedroche J J, et al. Improving the Functional Properties of Soy Glycinin by Enzymatic Treatment Adsorption and Foaming Characteristics[J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(2): 377-386.
- [15] Martinez K D, Sanchez C C, Patino J M R, et al. Interfacial and Foaming Properties of Soy Protein and Their Hydrolysates[J]. *Food Hydrocolloids*, 2009, 23(8): 2149-2157.
- [16] Tian Huafeng, Liu Dagang, Zhang Lina. Structure and Properties of Soy Protein Films Plasticized with Hydroxylamine[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 111(3): 1549-1556.
- [17] Jia Dongying, Fang Yu, Yao Kai. Water Vapor Barrier and Mechanical Properties of Konjac Glucomannan-Chitosan-Soy Protein Isolate Edible Films[J]. *Food and Bioproducts Processing*, 2009, 87: 7-10.
- [18] 张君红, 张丽叶. PAPI改性大豆蛋白复合材料的制备与性能研究[J]. *中国塑料*, 2013, 27(3): 42-46.  
Zhang Junhong, Zhang Liye. Preparation and Properties of PAPI Modified Soy Protein Isolate Composites[J]. *China Plastics*, 2013, 27(3): 42-46.
- [19] 郝建淦, 贾润礼. 玻纤增强大豆蛋白复合材料的制备工艺及性能研究[J]. *塑料助剂*, 2013(2): 34-38.  
Hao Jiangan, Jia Runli. The Research of Preparation Technology and Performance of SPI Enhanced by GF[J]. *Plastic Additives*, 2013(2): 34-38.
- [20] 何玲玲, 崔永岩, 刘泽鹏. 大豆蛋白/聚乙烯醇共混材料的制备及性能的研究[J]. *中国塑料*, 2013, 27(4): 34-37.  
He Lingling, Cui Yongyan, Liu Zepeng. Preparation and Properties of Soy Protein Isolate/PVA Blends[J]. *China Plastics*, 2013, 27(4): 34-37.
- [21] Cho S Y, Park J W, Batt H P, et al. Edible Films Made from Membrane Processed Soy Protein Concentrates[J]. *Lwt-Food Science and Technology*, 2007, 40(3): 418-423.
- [22] 张莉. 纳米 TiO<sub>2</sub>/SPI 复合物的制备与性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.  
Zhang Li. Preparation and Properties of Nano-TiO<sub>2</sub>/SPI Composites[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [23] Wu Ronglan, Wang Liuxi, Zhong Yu, et al. Cellulose/Soy Protein Isolate Blend Films Prepared via Room-Temperature Ionic Liquid[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2009, 48(15): 7132-7136.
- [24] Denavi G A, Mateos M, Anon M C, et al. Structure and Functional Properties of Soy Protein Isolate and Cod Gelatin Blend Films[J]. *Food Hydrocolloid*, 2009, 23: 2094-2101.
- [25] María Monedero F, María José Fabra, Pau Talens, et al. Effect of Oleic Acid-Beeswax Mixtures on Mechanical, Optical and Water Barrier Properties of Soy Protein Isolate Based Films[J]. *Journal of Food Engineering*, 2009, 91: 509-515.
- [26] 祝贝贝, 吴佳, 魏璇, 等. 基于光催化的 TiO<sub>2</sub>-大

- 豆分离蛋白包装膜的制备与表征[J]. 中国食品学报, 2013, 13(3): 35-41.
- Zhu Beibei, Wu Jia, Wei Xuan, et al. Preparation and Characterization of TiO<sub>2</sub>/SPI Blend Film[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2013, 13(3): 35-41.
- [27] 李彦磊, 陈复生, 刘昆仑, 等. 可生物降解材料及其评价方法研究进展[J]. 化工新型材料, 2013, 41(3): 8-10.
- Li Yanlei, Chen Fusheng, Liu Kunlun, et al. Research Properties of Biodegradable Materials and Its Evaluation Methods[J]. New Chemical Materials, 2013, 41(3): 8-10.
- [28] Li Yidong, Zeng Jianbin, Li Wenna, et al. Rheology, Crystallization, and Biodegradability of Blends Based on Soy Protein and Chemically Modified Poly(Butylene Succinate)[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009, 48: 4817-4825.
- [29] 苏峻峰. 环境友好大豆分离蛋白共混薄膜材料研究[D]. 天津: 天津大学材料学院, 2009.
- Su Junfeng. Environmental-Friendly Soy Protein Isolate Blend Films[D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2009.
- [30] 贾芸芝. 大豆蛋白/聚乙烯醇生物降解薄膜制备及性能研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2012.
- Jia Yunzhi. The Study on Preparation and Properties of Soy Protein/Polyvinyl Alcohol Biodegradable Film[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei, 2012.
- [31] Lacroix M, Le T C, Ouattara B, et al. Use of  $\gamma$ -Irradiation to Produce Films Femo Whey, Casein and Soy Proteins: Structure and Functional Characteristics[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2002, 63: 828-830.
- [32] 夏明涛, 熊柳, 孙庆杰. 可食膜对裹衣花生氧化抑制作用的研究[J]. 粮油食品科技, 2012, 20(6): 27-29.
- Xia Mingtao, Xiong Liu, Sun Qingjie. Study on Inhibition of Edible Films on Coated Peanuts Oxidation[J]. Science and Technology of Cereals, 2012, 20(6): 27-29.
- [33] 张赟彬, 王景文, 彭军. 不同精油单体大豆分离蛋白可食膜对冷鲜猪肉的保鲜效果研究[J]. 中国食品学报, 2012, 12(12): 72-77.
- Zhang Yunbin, Wang Jingwen, Peng Jun. Soy Protein Isolate Edible Film Incorporated with Essential Oil Monomers on Cold Fresh Pork Preservation Effect[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2012, 12(12): 72-77.
- [34] 刘开华, 张宇航, 邢淑婕. 含茶多酚的大豆分离蛋白涂膜对甜樱桃保鲜效果的影响[J]. 茶叶科学, 2013, 31(3): 67-73.
- Liu Kaihua, Zhang Yuhang, Xing Shujie. Effect of Tea Polyphenol-Incorporated Soy Protein Isolate Film-Coating on Fresh Preservation of Sweet Cherry[J]. Journal of Tea Science, 2013, 31(3): 67-73.
- [35] Sun Shaomin, Song Yihu, Zheng Qiang. Morphologies and Properties of Thermo-Molded Biodegradable Plastics Based on Glycerol-Plasticized Wheat Gluten[J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(7): 1005-1013.
- [36] 曹机良, 李晓春, 边亚敏, 等. 酸性染料对大豆蛋白/牛奶/聚乙烯醇共混纤维的吸附性能[J]. 纺织学报, 2013, 34(8): 83-88.
- Cao Jiliang, Li Xiaochun, Bian Yamin, et al. Absorption Performance of Acid Dyes on Soybean/Casein/Polyvinyl Alcohol Blend Fibers[J]. Journal of Textile Research, 2013, 34(8): 83-88.
- [37] Song Fei, Zhang Liming. Gelation Modification of Soy Protein Isolate by a Naturally Occurring Cross-Linking Agent and Its Potential Biomedical Application[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009, 48(15): 7077-7783.
- [38] Wang Yixiang, Cao Xiaodong, Zhang Lina. Effects of Cellulose Whiskers on Properties of Soy Protein Thermoplastics[J]. Macromolecular Bioscience, 2006, 6(7): 524-531.
- [39] Chen Pu, Zhang Lina. Interaction and Properties of Highly Exfoliated Soy Protein/Montmorillonite Nanocomposites[J]. Biomacromolecules, 2006, 7(6): 1700-1706.

(责任编辑: 徐海燕)

