

大豆蛋白光敏接枝物 SPI-g-P(VM-co-AMPS)的合成及溶液行为研究

白绘宇¹, 徐晶¹, 屈海军¹, 郑俊超¹, 李天纵¹, 刘晓亚^{1,2}

(1. 江南大学 化学与材料工程学院, 江苏 无锡 214122; 2. 江南大学 食品科学与技术国家重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘要:以偶氮二异丁腈(AIBN)为引发剂, 巯基乙胺(AET)为链转移剂, 通过自由基聚合合成了氨基封端的香豆素型光敏共聚物 $\text{NH}_2\text{-P(VM-co-AMPS)}$ 。再以 1-(3-二甲氨基丙基)-3-乙基碳二亚胺盐酸盐(EDC)和 N-羟基琥珀酰亚胺(NHS)室温催化大豆蛋白(SPI)上羧基和 $\text{NH}_2\text{-P(VM-co-AMPS)}$ 端氨基发生酰胺化缩合反应, 得到接枝物 SPI-g-P(VM-co-AMPS)。用傅里叶红外光谱、 $^1\text{H NMR}$ 对接枝物 $\text{NH}_2\text{-P(VM-co-AMPS)}$ 和 SPI-g-P(VM-co-AMPS) 进行结构表征。透射电镜、动态激光光散射、紫外可见光光谱、Zeta 电位仪对 SPI-g-P(VM-co-AMPS) 的水溶液行为进行研究, 结果显示: SPI-g-P(VM-co-AMPS) 在水溶液中形成粒径 R_h 为 105 nm 的球形聚集体, 该聚集体表现出较好的光响应性。

关键词:大豆蛋白; 接枝改性; 香豆素; 光敏聚合物; AMPS

中图分类号: TS214.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-9841(2011)03-0475-05

Synthesis and Solution Behavior of Photo-sensitive Graft Copolymers Based on Soy Protein Isolate

BAI Hui-yu¹, XU Jing¹, QU Hai-jun¹, ZHENG Jun-chao, LI Tian-zong, LIU Xiao-ya^{1,2}

(1. School of Chemical and Material Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122; 2. State Key Laboratory of Food Science and Technology, Jiangnan University, Wuxi 214122, Jiangsu, China)

Abstract: The amino-terminated photo-sensitive copolymers ($\text{NH}_2\text{-P(VM-co-AMPS)}$) were first prepared via a free radical polymerization. Then the graft copolymers (SPI-g-P(VM-co-AMPS)) were prepared by a graft reaction between the carboxylic acid groups of soy protein isolate (SPI) and the amino groups of $\text{NH}_2\text{-P(VM-co-AMPS)}$ using 1-(3-(dimethylamino) were characterized by FTIR and $^1\text{H NMR}$. The aqueous solution behavior were studied by transmission electron microscopy (TEM), dynamic light scattering (DLS), UV-vis spectroscopy, zeta potential. The results showed that SPI-g-P(VM-co-AMPS) could self-assemble into the spherical aggregates with the average size (R_h) of 105 nm. UV-vis spectra confirmed that the aggregates was photo-crosslinkable.

Key words: Soy protein isolate; Graft modification; Coumarin; Photo-sensitive polymer; AMPS

大豆蛋白 SPI 是一种可生物降解、来源广泛、环境友好的天然高分子, 其成本低, 无毒, 再生速度快^[1-3]。近年来, 随着石油、煤、天然气等不可再生资源的日趋枯竭以及现代化工引起的严重环境污染不断加剧, 关于大豆蛋白的材料化研究备受关注^[4-5]。一直以来, 大豆蛋白的改性成为蛋白研究热点之一, 但是改性后是否会破坏蛋白原有的无毒、环境友好等特性, 是困扰着许多致力于蛋白改性研究工作者们的难题, 目前对大豆蛋白改性的常用方法有共混改性^[6-8]、化学接枝改性^[9-11]、交联剂改性^[1]等。其中, 戊二醛、环氧氯丙烷等化学交联剂虽然能对蛋白质进行交联改性, 使多肽链粘合更加紧密, 但是这些化学交联剂的使用给环境带来很

大威胁, 已逐渐被生物交联剂(如: 谷氨酰胺转氨酶等)所替代^[12]。

光诱导交联是一种新型的交联手段, 光敏聚合物是一类含有光敏基团的刺激-响应型“智能”聚合物, 其结构中的光敏感基元能够对外界光刺激(如紫外、近红外等)作出快速响应, 并发生相应的物理、化学性质的变化^[13-14]。光刺激交联作为一种特殊的调控交联手段, 其优越性主要表现在可以通过对照射频率、位置、强度及时间长短进行选择, “定时、定点、定速”地实现“智能”调控, 而且光交联手段符合绿色环保的理念。香豆素具有可逆二聚交联特性, 因而关于香豆素类光敏聚合物的研究越来越广泛^[15-18]。

收稿日期: 2011-03-29

基金项目: 江南大学自主科研计划资助项目(JUSRP21112); 江南大学大学生创新训练计划资助项目。

第一作者简介: 白绘宇(1972-), 女, 副教授, 博士, 从事天然高分子材料研究。E-mail: bhy.chem@163.com。

œZ ÁÂ f ° v ž â ' p 5 , q , μ , f 0
 ý ÷ ã Šýá üŠ Šüü âš \$ – ôóòT ý ÷ ¼ Ý &
 ' • Ž ½ A ò ĭ 5 9 ý ÷ ã Šýá üŠ Šüü â § 5
 † ~ à † Ý 8 f p e š U f ° & ' • Ž Ō = 6 0
 ý ÷ Šýá üŠ Šüü âš † v d & ' • Ž q , Ý
) : - ê - í Š • - x ÷ Û d 6 0 ± [€ • z
 “ š • ĭ B š x n , , ü • é ! ĭ ï ý d ^ ,
 f x ú ² ³ • Q € • 1 2 â - μ x Ü p ^ , > e
 - ê œ — ° U ! Ä M , R € q â ' p 5 , Ä û á
 & ' • Ž ± [* š Ý & ' • Ž Ä , R € q U V â
 Q & ' • Ž : - ° Y v - O — â Q • Ž ' / q R
 € U c ° Y v - q [\ ê

ã, OP - QR

ã%ã, OP - æç

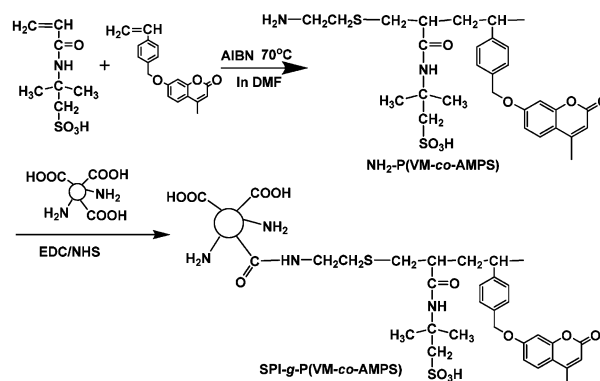
& ' • Ž á ý ÷ ã Ž † ž . & Â ëäÜ š b
 , f ~ 0 (S ¹ F Ú Ý š ' p ½ ' c C 7 ý æ
 q O — A m ô š 5 š š ß à 5 ' a ' < 5 â '
 p á ü ã ½ ' ò " ý ää q O — A m ô š š š š § 5
 Œ 5 â š š 5 † M a † f " f á ó ó ò â T ý š 5 Ō
 Ō à a † á ý ÷ â š Ä , Q ëëÜ š ½ à È é ~ Ý (S † P ¹ F Ú Ý ô ä š à à † 5 š š 5 Œ p ~
 á ð ü ý â š Ä ëëÜ š , & ß • Ú Ý) ¹ F Ú
 Ý š „ M y á Ō á ð š ý â š) ; ' ĭ š ů † T ,
 Ú Ý Ō Á ú ß t ää < ± p ... 0 - ô N 5 ß †
 á ð ô ä š Ä , Q ëëÜ š @ A = • Ý) ¹ F Ú
 Ý š Ō p ä š ä š X à á á ÷ ô ä ý á ý š 5 ' à
 † á ó ü ô š Q f „ ; ' ĭ ää A * + â \ f ' ½
 à ' ĭ Ú Ý ê

õ ü ð ä ä ä ä š ä ä š Í Š • - x , ä Ý õ ø å#
 • & õñ " Šü š ä ä š V Ū Ê Ū Ý á ÷ ý ü ää
 + ô ð ! š ä ä ä š Ì Ō ä 9 Ú ä Ý ö y ò ð ð + ô
 ó ð ä ä š ð n ' a b • k Ý ó ð ä š N ü !! Ú
 Ý Ō ð Ū š ä ä ä š ð n , , ü • ó ú ä + ð Ū Ú Ý ô
 ! ' ä ä ä ä š ĭ ï Ý ä © + ü # Ú Ý ô ů š
 p ū ů ū š ä ä ä š ð 9 • ĭ B á ô ū ää † ů p ū ĭ % ,
 ... 7 ĭ ô ý p ô ð ò ä ä ä ū ä H ä ä š + Q
 • ĭ á † P ¹ F Ú Ý ô š ä ä ä š r , Ý μ x š Ō Ō
 , f , , Ä Ä á Š ää + ? @ G „ b - Ý š ¹
 F æ • Ú Ý ê

ã%ã, TVQR

ã%ã%ã, Ä w s x 2 ý ÷ ã Šýá üŠ Šüü ä% / 0 ,
 ý ÷ ã Šýá üŠ Šüü â q f ° » ¼ Ý 5 ó M
 äé% ð ü ý T ää% ü ² Ä äç ü
 ó ü ô * äç “ ” b „ Ä ääç ... # û ä ð ô
 T ä ð š ý ä - b „ Ä äç äš ... ¹ † * ÷ ä

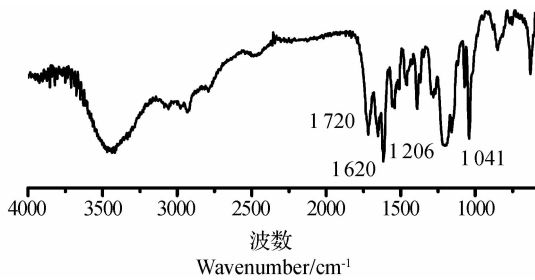
ç û èä' . B * š p e ê ... M p - ä ä ä û ÷ ò
 * ĭ Ä ä M 3 • 0 äš ... - ç û ó ü ô ² H äš -
 ä ä ä û ÷ ò ĭ Ä äš ... ÷ M 3 • 0 äš ... K ää' \ j
 * € Œ Ō á < ê
 ä%ä%ä, ý ÷ ã Šýá üŠ Šüü ä% ĭ - :] y © z ,
 • - ůñ Ū b — â - í Š • u K - x , ä Ý : W
 ä%ä%ä * , μ Ê , 0 ý ÷ ã Šýá üŠ Šüü ä q ĭ “
 5 ' š ð ÷ ý ü f „ : W œ , f 0 q ± [Ō ° š ĭ
 Q ó ü p š è ä ç 0 Q " \ 5 ç • ô ö y ò “ W œ ,
 f 0 q f % • • f í š S • ĭ Ú ä ; ó ü ô äš ä
 Q ý ð ô ô ô ò “ W œ , f 0 q f „ Ý ç u ä Ä ä
 „ Ä Ä è ä • Q ä ä ä û è ß ä ää a 3 <
 ää' è ß ä ä b ž > Q ß ä ä † ä ä ä' ê
 ä%ä%ä, ! " { | - } • 2 ý ÷ Šýá üŠ Šüü ä
 % / 0 : © z , & ' • Ž 9 ý ÷ ã Šýá üŠ Šüü â
 q ô ó ò á ý ÷ ¼ Ý 8 f Ō = p e Ý 5 Œ ° - ç ä ä ä
 ä ä ä û q ÷ * é%ç q ä 7 ² ³ ² H ä% ý ÷ ã Šý
 á üŠ Šüü ää ä% ý ÷ ä% ää ô ó ô é ä% ä ä è
 ý ÷ äç “ 0 ^ á f ² H äš ... ! ¥ ² ³ ñ ... # û
 ä ä ä û ð ÷ * * äç “ ä ä ä' 5 p e äæ ê p e 6
 0 - ä ä ä û Œ ä ĭ Ä äš ... - ß t ° äæ ... M
 p K ää' \ j * € Œ Ō á < ä ä á & ' • Ž q Ō =
 6 0 ý ÷ Šýá üŠ Šüü äë ý ÷ Šýá üŠ Šüü
 ð ü ý ä q f ° c > Ō í äë



E ä, ý ÷ Šýá üŠ Šüü ä ĭ p è s
 õ %ã, & ! " ! ý ÷ Šýá üŠ Šüü ä
 ä%ä%ä ý ÷ Šýá üŠ Šüü ä ý ~ p ^ • © z ,
 ó ü “ W ý ÷ Šýá üŠ Šüü â f x q ^ \ • ^
 f í š , ' é Q è ä ä% ää •) Q è ä š Ä ä Q
 ä ä ç% ä † ä% ä ä' ä ý ÷ Šýá üŠ Šüü äš ³ õ
 Ō c ^ ½ â - a € Œ æ ... â - ô ū x ø ý ÷ Šý
 á üŠ Šüü ä q & é ô Š Ū p ç ® , ' ± .
 5 ý ÷ Šýá üŠ Šüü äš ³ q » , Ä u Ý ô !
 ĭ ï “ W ç ® , ' ± . 5 ý ÷ Šýá üŠ Šüü â
 f x z Ō q ê ĭ • ê

ä, WX - € •

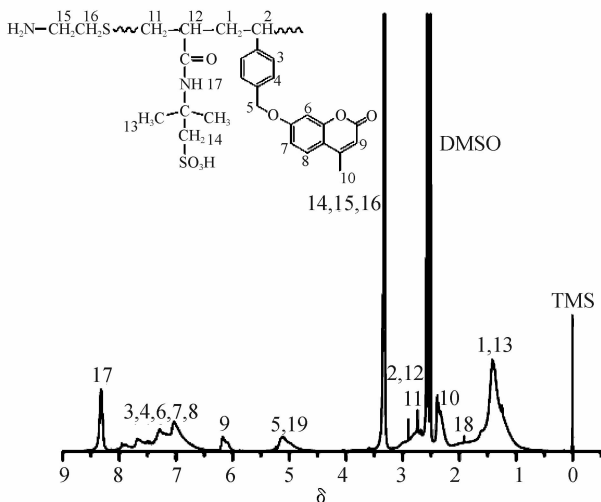
ä%ä, ¥ (é ê e È (ĭ ^ ý ÷_ä Š ý ü Š Š ü ý â ħ
 ĭ p - u '
 , , í äQ ý ÷_ä Š ý ü Š Š ü ý â ħ - x ä í ê ä
 èää ß_ä T ä éää ß_ä j p ‡ ^ Ð q á † ë 5 » Ô
 T ĭ ë 5 » Ô ä 8 Â ð ü ý c á † 5 T ü c á
 ' p â ĭ ê ä ääè ß_ä T ä ääè ß_ä ä j 9 3 q »
 Ô á 2 Â p " 5 ' ½ í p É 8 Ü S T Š q É 8
 Ü S ê ä ääè ß_ä j p ‡ q 9 3 ¼ o ä ä 2 Â † ,
 § 5 q » Ô ê ž • - x ™ š ä » Ç ä ý ÷_ä Š ý ü Š
 Š ü ý â ħ ° ° U ê



E ä, ý ÷_ä Š ý ü Š Š ü ý â ħ ë ĺ Ž E

ō %ä, ø ! ý ÷_ä Š ý ü Š Š ü ý â

Á ~ Ê , 0 ý ÷_ä Š ý ü Š Š ü ý â ħ ã ÷ ý ü
 ± ² Ý í ä 3 ' ä - , f 0 á † X á ³ ó è %ä ß è %ä
 T è O q Ō † ½ X á ³ ó è %ä ß è %ä ä ħ Ō f • d 3 Â
 p , Ä ĭ Â æ p , f 0 * ð ü ý 9 ü 5 , 0 † q .
 p , Ñ Q ä %ä š è 2 9 k g • / , ä ä š ä 1 ÷ ñ ä
 • Q , f c > * ~ ° v ð ü ý q , , 0 ê



E ä, ý ÷_ä Š ý ü Š Š ü ý â ħ ã ÷ ý ü Ž E

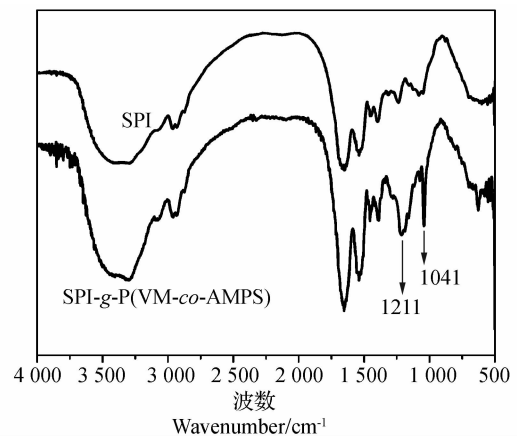
ō %ä, ã ÷ ý ü ! ý ÷_ä Š ý ü Š Š ü ý â

• öyö" W ä f 0 ý ÷_ä Š ý ü Š Š ü ý â ħ
 ~ , f %• ü Q ä %äè ^ ääè è ß_ä ä , f %•
 Q ü š ääè ^ ääè è ß_ä ä ü š ä ä äè . ó ò

" Wœ , f 0 ý ÷_ä Š ý ü Š Š ü ý â ħ f , Ý ċ u
 a À Q ääè %ä' ê 6 0 - G b q A ò 5 , f " b
 c ¹ ċ é ĭ N 5 ß † « m f %• ä , f 6 0 f %
 • 9 ñ ñ f í 9 ¼ ê

ä%ä, ! " & ' W ä e ^ ý ě Š ý ü Š Š ü ý â ħ
 ĭ p - u '
 í ä ħ ý ÷_ä Š ý ü Š Š ü ý â ħ

q - x ä í ä ħ ý ÷_ä Š ý ü Š Š ü ý â ħ
 ä ääè ß_ä T ä ääè ß_ä j p ‡ v 9 3 q - » Ô o è
 f ° á 2 Â í p É 8 Ü S T ß p É 8 Ü S ä ĭ p
 9 ß p d L A Ä Ō = ¹ ý ÷_ä Š ý ü Š Š ü ý â ħ q p
 " 5 ' ê 6 ' Ä ĭ Ç ä ý ÷_ä Š ý ü Š Š ü ý â ħ ° U
 Ō = á & ' • Ž ½ ê



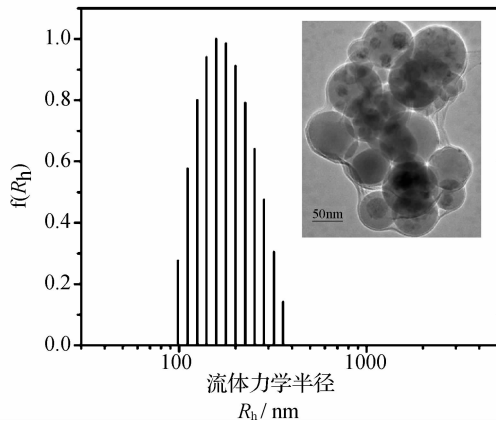
E ä ħ ý ċ ý ě Š ý ü Š Š ü ý â ħ ë ĺ Ž E

ō %ä ø ! ý ÷_ä Š ý ü Š Š ü ý â

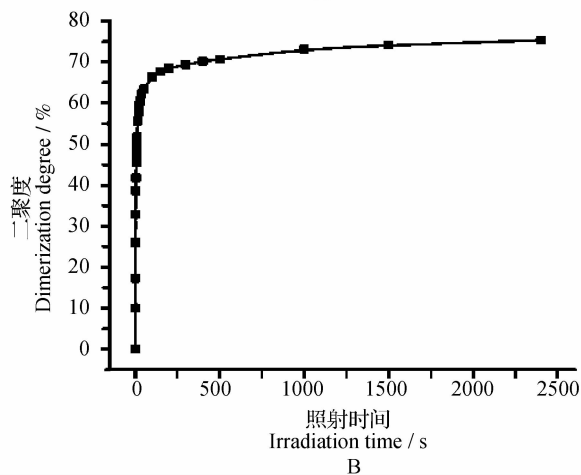
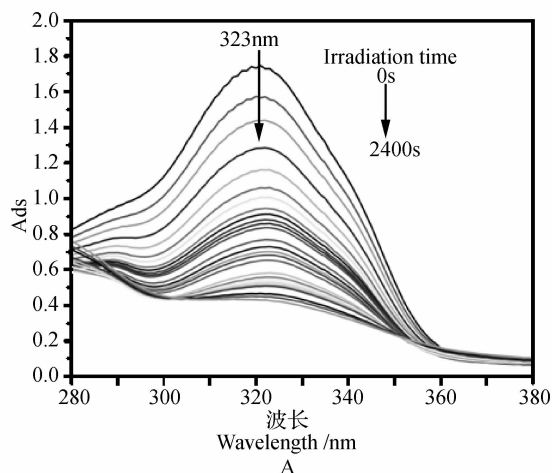
á ü Š Š ü ý â

ä%ä, ý ě Š ý ü Š Š ü ý â ħ í ä , b À
 ä %ä %ä, ý ě Š ý ü Š Š ü ý â ħ 4 { % Á € + c
 • , S x n , , ü • á ó ü ä 1 2 , f x ² ³ • Q
 q ¹ Ō Ō - p w ä ý ě Š ý ü Š Š ü ý â ħ f x K
 ú ² ³ * q • x {) J \ á ä ħ í Ý í ç 3 ' ä
 ³ ' q , f x J \ Q ääç ĭ ĭ ê ö ü ä ħ í ç
 ä x í ä ± ² z › ý ě Š ý ü Š Š ü ý â ħ f x 7
 ‡ à Ð & é ä Q o à * x Ø á w W q G Ú ê F ä
 È 6 Q Ō = ¹ * ü ¹ c ½ q q Ō ĭ % v ¹ À 9
 & ä ü ¹ c 6 9 3 q ` ú / - , f K ä V * ê
 ä %ä %ä, ý ě Š ý ü Š Š ü ý â ħ 4 { % Ä w] f
 g , ä ' p Ä ¹ ĭ q , M , ĭ - ä w ' é q μ
 x , ' • V ` a ^ † ~ M , R ∈ p e ä ü ý äç
 é ä ' p 5 , Ä ü á , f 0 ± [* ä c A Ō ¾ t u
 Ä , R ∈ q Ō Ÿ ê 6 ' ä ä ' p 5 , Ä ü á & ' •
 Ž ± [* ä ä Ý • Ž ' / w W q , > e - V ê

í è Q š , ä Ü p ý ě Š ý ü Š Š ü ý â ħ
 ð ü ý â ħ f x q μ x , ` a R ∈ c > ä ĭ è ð Ä
 G ää ää j ä ' p 5 , q ĭ " o q » , Ä ä , '

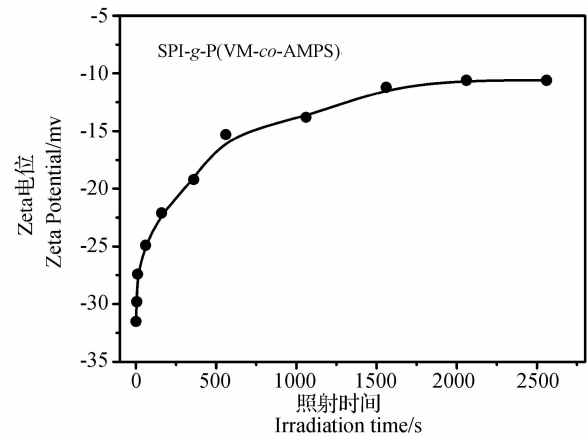


E ç, ÿœŠŸá üŠ Šüÿ ã Ÿ ‹ * ^ ‹ Å.
 í í á â > —î ï f ðª U
 õ %œ, & & " á â ! " !
 ôü ÿœŠŸ
 á üŠ Šüÿ â !



E è, ñ ç ò ó ÿœŠŸá üŠ Šüÿ ã, e Ó
 ô³ ° áðā ò (á ò eª è ` ö • * = x ÷ ø áñâ
 õ %œ, Š ! ! ! ÿœŠŸá üŠ
 Šüÿ â " " " ! " !
 áðâ ! ! ' !
 á Š â áñâ

± . È é ! ô 8 ā ð È 6 Qā ' p 5 , † ~ v ,
 M, R ∈ p e ê í èñQ, M, À å , ´ ± . q u
 Ý à ‡ ã²³ ´ ¢M, À ñ Ÿ 3 " & ð ... > Å Ø
 ã å v O Ô R ∈ ... # å R ∈ å ' p ž . & & 8 ā ô
 { w O Ô R ∈ ... å f x * å ' p 5 , ^ S V { 8
 ã ð á O Ô ä 6 a õ å ' p 5 , q¹ O Ô æ %œ <
 o C å ð M, À " & > Ÿ u ā ð Ö %œ ç u ê
 ` í é Ä ï # þ å ÿœŠŸá üŠ Šüÿ â !
 Ĩ ï Q Ũ ð È 5 Å Ö =¹ ½ ž¹ B o þ " ž @
 % ê å æ , ´ ± . q " # å ÿœŠŸá üŠ Š
 ð Ÿ Ÿ å f x q ! Ĩ ï ! ô ½ ó ê c " • Q å
 ´ 0 u Ö =¹ * q å ' p 5 , † ~ M, R ∈ å c
 P å › î K å f þ " ž 7 å þ P å V ^ S å ð
 , f x z Ô þ " ž ž . 8 ā ð ‡ þ ! Ĩ ï 7 ç
 ä " # q > Ÿ ê



E é, \] eª è ` m ÿœŠŸá üŠ Šüÿ â
 (Ÿ ‹ * ! f ;
 õ %œ, ! ! ! ÿœŠŸá üŠ Šüÿ â
 ! " !

å, W , •

b c A ò 5²³, f — f ° v § 5 †, , µ
 , f 0 ý ÷ₐ ŠŸá üŠ Šüÿ åñ ò ó ò á ÷ ¼ Ý
 ý ÷ₐ ŠŸá üŠ Šüÿ åñ, § 5 T & ' • Ž á Ÿ ð ½
 A ò Ĩ 5 † ~ à † Ý 8 f p e ð U ! ý ÷ₐ ŠŸá üŠ
 Šüÿ æ¹ Ö = á & ' • Ž ½ å ‡ v d & ' •
 Ž q, z⁻ : ⁻ ê ÿœŠŸá üŠ Šüÿ å f x Q
 à & & é å \ Q åñç ã¹ 9 ë q, > e⁻ ê

参考文献

- [1] 李海萍, 易菊珍. 大豆分离蛋白改性的研究进展[J]. 高分子通报, 2009(2):58-63. (Li H P, Yi J Z. Modification study of soybean protein isolate[J]. Polymer Bulletin, 2009(2):58-63.)
- [2] 李川, 李娅娜, 刘虎成, 等. 大豆蛋白改性[J]. 食品工业科技, 2000,21(3):75-76. (Li C, Li Y N, Liu H C, et al. Soy protein modification methods[J]. Science and Technology of Food Industry, 2000,21(3):75-76.)
- [3] 张俐娜. 天然高分子改性材料及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006. (Zhang L N. Natural macromolecules modified material and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.)
- [4] Jiang J, Chen J, Xiong Y L. Structural and emulsifying properties of soy protein isolate subjected to acid and alkaline pH-shifting processes[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2009, 57(16):7576-7583.
- [5] Liu D G, Tian H F, Jia X W, et al. Effects of calcium carbonate polymorph on the structure and properties of soy protein-based nanocomposites[J]. Macromolecular Bioscience, 2008, 8(5):401-409.
- [6] Graiver D, Waikul L H, Berger C, et al. Biodegradable soy protein-polyester blends by reactive extrusion process[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2004, 92(5):3231-3239.
- [7] Jia D Y, Fang Y, Yao K. Water vapor barrier and mechanical properties of konjacglucomannan-chitosan-soy protein isolate edible films[J]. Food and Bioproducts Processing, 2009, 87(1):7-10.
- [8] Fang K, Wang B B, Sheng K C, et al. Properties and morphology of poly(lactic acid)/soy protein isolate blends[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2009, 114(2):754-759.
- [9] 刘晓亚, 姜鹏, 周华, 等. 大豆分离蛋白接枝氨基封端聚 2-丙烯酰胺基-2-甲基丙磺酸的合成及溶液性质研究[J]. 高分子学报, 2009(5):430-436. (Liu X Y, Jiang P, Zhou H et al. Synthesis and aqueous solution properties of graft copolymers based on soy protein isolate with amino-terminated poly(2-acrylamido-2-methyl propane sulfonic acid)[J]. Acta Polymerica Sinica, 2009(5):430-436.)
- [10] 周华, 姜鹏, 杨成, 等. 原子转移自由基聚合法合成大豆分离蛋白-g-聚甲基丙烯酸 2-羟乙酯[J]. 高分子学报, 2008(5):424-429. (Zhou H, Jiang P, Yang C, et al. Graft polymerization of 2-hydroxyethyl methacrylate on soy protein isolate via atom transfer radical polymerization[J]. Acta Polymerica Sinica, 2008(5):424-429.)
- [11] 唐蔚波, 周华, 周翠, 等. 接枝改性大豆蛋白胶粘剂的合成及性能研究[J]. 大豆科学, 2008, 27(6):1032-1036. (Tang W B, Zhou H, Zhou C, et al. Synthesize and characterize of grafted soybean protein adhesives[J]. Soybean Science, 2008, 27(6):1032-1036.)
- [12] Gan C Y, Cheng L H, Easa A. Physicochemical properties and microstructures of soy protein isolate gels produced using combined cross-linking treatments of microbial transglutaminase and maillard cross-linking[J]. Food Research International, 2008, 41(6):600-605.
- [13] 舒巧珍, 陈欣, 陈开花, 等. 双亲性光敏感遥爪聚合物 C-PNIPAAm 的合成与性能[J]. 物理化学学报, 2010, 26(10):2845-2850. (Shu Q Z, Chen X, Chen K H, et al. Synthesis and properties of amphiphilic photosensitive telechelic polymer C-PNIPAAm[J]. Acta Physico-Chimica Sinica, 2010, 26(10):2845-2850.)
- [14] He J, Zhao Y, Zhao Y. Photoinduced bending of a coumarin-containing supramolecular polymer[J]. Soft Matter, 2009, 5(2):308-310.
- [15] Jiang J Q, Qi B, Lepage M, et al. Polymer micelles stabilization on demand through reversible photo-cross-linking[J]. Macromolecules, 2007, 40(4):790-792.
- [16] Babin J, Lepage M, Zhao Y. "Decoration" of shell cross-linked reverse polymer micelles using ATRP: A new route to stimuli-responsive nanoparticles[J]. Macromolecules, 2008, 41(4):1246-1253.
- [17] He J, Tong X, Zhao Y. Photoresponsive nanogels based on photo-controllable cross-links[J]. Macromolecules, 2009, 42(13):4845-4852.
- [18] Zhao Y, Bertrand J, Tong X, et al. Photo-cross-linkable polymer micelles in hydrogen-bonding-built layer-by-layer films[J]. Langmuir, 2009, 25(22):13151-13157.
- [19] 杨金会, 计从斌, 赵艳敏. 一水硫酸氢钠无溶剂催化合成 4-甲基香豆素[J]. 有机化学, 2008, 28(10):1740-1743. (Yang J H, Ji C B, Zhao Y M. NaHSO₄ · H₂O catalyzed synthesis of coumarin derivatives under solvent-free conditions[J]. Chinese Journal of Organic Chemistry, 2008, 28(10):1740-1743.)
- [20] Fu Q, Cheng L L, Zhong Y, et al. Preparation and reversible photo-crosslinking/photo-cleavage behavior of 4-methylcoumarin functionalized hyperbranched polyester[J]. Polymer, 2008, 49(23):4981-4988.