

doi:10.3969/j.issn.1674-7100.2013.04.003

# 谷氨酰胺转氨酶改性蛋白类生物包装膜研究进展

滑艳稳, 陈志周, 尹国平

(河北农业大学 食品科技学院, 河北 保定 071000)

**摘要:** 谷氨酰胺转氨酶(TG)来源广泛, 微生物、动物、植物体内都存在TG, 其广泛应用于食品、纺织、医药、皮革等领域。综述了谷氨酰胺转氨酶对大豆分离蛋白膜、谷朊粉膜、花生分离蛋白膜、玉米蛋白膜等植物蛋白类生物包装膜和明胶膜、乳清蛋白膜等动物蛋白类生物包装膜性能的影响。蛋白类生物包装膜和其他材料的复合研究, 将是未来可降解性膜的研究趋势之一。

**关键词:** 谷氨酰胺转氨酶; 植物蛋白膜; 动物蛋白膜

中图分类号: TB484

文献标志码: A

文章编号: 1674-7100(2013)04-0009-06

## Advance in Study of Transglutaminase Treatment Improving Properties of Protein Biological Packaging Films

Hua Yanwen, Chen Zhizhou, Yin Guoping

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

**Abstract:** There is a wide variety of sources of transglutaminase, such as from microorganisms, animals and plants. It is widely used in the application in food, textile, pharmaceutical, leather and other fields. The impact of transglutaminase on the properties of plant protein biological packaging films of soybean protein isolate film, wheat gluten film, peanut protein isolate film, corn protein film and animal protein biological packaging films of gelatin film, whey protein film is reviewed. The study on the composite of protein biological packaging film with other materials is the trend of biodegradable film research in future.

**Key words:** transglutaminase; plant protein biological films; animal protein biological films

## 0 引言

化学合成的塑料制品因具有抗腐蚀性好、质量较小、价格便宜等特点, 被广泛应用于食品包装领域, 但因其废弃物不易分解, 会给环境造成严重的“白色污染”, 故解决化学合成塑料造成的环境污染

问题已经迫在眉睫。据国际包装工业发展情况统计: 食品包装材料约占全部包装材料用量的50%; 在给环境造成危害的垃圾中, 塑料废弃物占72%, 其中很大一部分来源于食品塑料包装废弃物<sup>[1]</sup>。近年来, 随着人们的环保意识及对食品品质、保鲜期要求的提

收稿日期: 2013-06-27

基金项目: 河北省科技计划基金资助项目(10225151)

作者简介: 滑艳稳(1989-), 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: mmhyw89@163.com

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

高,可降解性的蛋白类生物包装材料被广泛关注。蛋白类生物包装膜的原材料来源广泛,并具有一定的机械性能、阻隔性能、成膜性能和可降解性,是一种环保的绿色包装材料。但与化学合成塑料相比,蛋白类生物包装膜的机械强度较低且透水性较高,如要实现工业化生产,还需有效改善其机械性能和阻隔性能。

蛋白质分子在溶液中呈一种紧密卷曲的结构:表面被一层水化膜包围着,从而具有相对稳定性,通过加热或酸、碱、盐等处理,蛋白质分子可从卷曲状态舒展开来,使原来分子内部的疏水基团、巯基暴露出来,蛋白质分子间就可以通过疏水键、二硫键的结合,形成立体网状结构,适当条件下便可得到具有一定阻隔性能和机械强度的蛋白膜<sup>[2]</sup>。谷氨酰胺转氨酶(transglutaminase, TG)可催化蛋白质或多肽分子,使其共价交联,并形成分子内或分子间的网状结构,进而改善蛋白质的结构和功能<sup>[3]</sup>。充分发挥蛋白类材料的可再生性、可降解性、无毒无害性,并利用TG的温和性、专一性,有效改善蛋白类生物包装膜的机械性能,以拓宽可再生资源在包装材料方面的应用,实现环境友好型生物降解材料部分代替化学合成塑料。因此, TG改性蛋白类生物包装膜的研究,对实现绿色包装具有重要意义。

## 1 谷氨酰胺转氨酶

谷氨酰胺转氨酶又名转谷氨酰胺酶,由Clarke等人于1957年第一次提出,用来描述促使豚鼠肝脏酰基转移酶的活性<sup>[4]</sup>。TG在自然界来源广泛,微生物、动物、植物体内都存在TG。起初, TG主要从动物肝脏组织取得,其取得困难且分离工艺复杂,故生产成本较高,难以在实际生产中推广应用。20世纪80年代末, H. Ando等人<sup>[5]</sup>利用微生物链轮丝菌 *streptovercillium* 发酵生产谷氨酰胺转氨酶,经分离,提取得到纯化了174倍的酶。1993年,日本味之素公司正式将微生物TG产品推向市场,并投入工业化生产和试用<sup>[6]</sup>。随着微生物TG的大规模工业化生产,其生产技术不断提高,成本逐渐降低,在食品、纺织、医药、皮革等领域得到广泛应用。

### 1.1 TG的来源及其性质

TG主要来源于动物肝脏组织与微生物。

来源于动物肝脏组织的TG较稀少且分离工艺复杂,故生产成本较高,不易在实际生产中推广。其活性中心包括一个Cys残基,等电点为4.5,与微生物TG相比,其热稳定性能、pH值、温度、对底物的

要求等均不相同,且来源于不同肝脏组织的TG,其性质也不完全相同,但其活性中心均依赖于Ca<sup>2+</sup><sup>[7]</sup>。

来源于微生物的TG是经微生物发酵而得,属于胞外酶,构型呈球状,容易分离。其活性中心包括带有自由巯基的Cys残基分泌型蛋白质,具有亲水性,但有疏水性部分分散在序列中,被安置在酶表面的亲水区,对酶活性的影响尚未发现。活性不依赖于Ca<sup>2+</sup>,较为稳定,经过离心和过滤后的滤液在-20℃时可贮存几个月而酶活性平均损失仅10%,重复溶解和冷却后,并未明显增加酶活性的损失,经过纯化后的酶更为稳定<sup>[8]</sup>。来源于微生物的TG最适合的pH值为6.0,最适合的反应温度为50℃。

### 1.2 TG的作用机理

TG是一种催化酰基转移的酶,能够催化酰基供体和酰基受体之间的酰基转移。酰基供体为肽链中谷氨酰胺残基的γ-羟酰胺基。酰基受体一般分为3种<sup>[8-9]</sup>:一是酰基的转移反应,酰基受体为伯氨基、蛋白质和小分子伯胺连接;二是蛋白质或多肽的Gln和Lys之间的交联反应,酰基受体为多肽中赖氨酸残基的ε-氨基,ε-氨基在蛋白质分子内、分子间形成ε-(γ-谷氨基)赖氨酸异肽键(G-L键),从而使蛋白质发生交联;三是脱酰胺反应,酰基受体为水,谷氨酰胺残基水解,生成谷氨酸和氨。

### 1.3 TG的应用前景

TG因具有独特的功能特性,广泛应用于食品、纺织、医药、皮革等领域。在食品领域, TG通过不同的催化反应,可改善肉制品、面类制品、豆制品、油脂制品、蛋奶制品等食品的口感、风味、组织结构和营养,提高食品的弹性和持水能力;在纺织领域, TG可以增强羊毛纺织品的抗毡缩性和染色性,减少起毛起球,使抗菌物质固定化,还可用于纺织工业的清洁生产<sup>[10]</sup>;在皮革领域, TG可有效控制皮革制品的防毡缩,使抗菌物质固定化,从而有效改善其外观和质地;在医药领域, TG可以促进Ca<sup>2+</sup>的吸收,降低骨质疏松症的发生,还可在凝血过程中加固纤维组织,加速伤口愈合,促进矿物质在肠道中的吸收等。

## 2 TG对蛋白类包装膜性能的影响

### 2.1 对植物蛋白膜性能的影响

#### 2.1.1 大豆分离蛋白膜

大豆分离蛋白(soybean protein isolate, SPI)是以低温脱溶大豆粕为原料生产的,其蛋白质质量分数在90%以上,含氨基酸种类近20种,其中包括人

体必需的氨基酸,营养丰富,不含胆固醇,具有良好的乳化性、水合性、吸油性、凝胶性、发泡性、结膜性等。经酶法改性,可有效提高其机械性能,成为较好的绿色包装材料。甘油可以减少蛋白质相邻链间的分子内相互作用,降低膜的脆性,增加分子间的空隙,从而赋予蛋白膜一定的柔韧性。

酶具有专一性,反应过程温和,易于控制,很少或没有副反应。影响酶活性的2个主要因素是反应温度和pH值,因此,控制好TG的用量、反应温度和pH值,就可有效控制其与蛋白的交联作用,从而有效提高膜的功能特性。

在一定浓度范围内,SPI膜的机械性能随着TG浓度的增加而显著增加,当达到一定浓度时,SPI膜的机械性能反而会下降,原因是高质量分数的TG在改性SPI的同时会与其作用而发生聚沉反应。SPI膜的蛋白质等电点为4.5~4.8,当pH值接近蛋白质等电点时,SPI会产生大量的沉淀而无法成膜。TG的最适合pH值为6.0~8.0,随着pH值逐渐增加,SPI膜的断裂伸长率逐渐增大,膜的颜色逐渐加深并发黄,在一定程度上会影响膜的透光率。TG在45~55℃范围内活性较高,在此温度条件下酶反应的效率较高。

张子德等人<sup>[11]</sup>研究了可食性大豆分离蛋白的成膜工艺,结果发现,在质量分数为4.0%的大豆分离蛋白溶液中添加体积分数为1.5%的甘油,调制膜液pH值为8.0~8.9,于50~60℃恒温箱中干燥17~18h,可得到性能较好的可食性薄膜,其颜色为淡黄色,抗拉伸强度达3.90 MPa,透气度为0.0013 μm/(Pa·s),透光率为84.4%。

王昊等人<sup>[12]</sup>通过测定酶法改性分离蛋白膜的抗拉强度、断裂伸长率、透水性、透氧性、透光度等性能指标,确定最佳工艺参数为:SPI质量分数为5.0%,增塑剂(甘油)体积分数为2.0%,TG质量分数为0.15%,pH值为8.0。张春红等人<sup>[13]</sup>研究了TG对SPI的改性机理,结果发现:当反应温度为50℃,pH值为7.0,SPI质量分数为15%,TG添加量为0.3 U/g SPI时,SPI的凝胶性为11.6 kcp,与对照组相比,提高了1 833%。

胡坤等人<sup>[14]</sup>研究了TG对SPI薄膜拉伸性能的影响。结果表明,在50℃条件下,当TG酶处理时间小于60 min时,SPI膜的抗拉强度、杨氏模量、变性温度、热焓值都随着处理时间的增加而增加;当处理时间大于60 min时,SPI膜的上述性能随着处理时间的增加而逐渐降低;当处理时间为90 min时,SPI膜的性能急剧下降。经十二烷基硫酸钠(dodecyl sulfate, sodium salt, SDS)-凝胶电泳分析推断,原

因可能是处理时间小于60 min时,TG逐渐催化SPI形成高分子量的蛋白质聚合物,随着时间的增加,酶分子变性失活,蛋白质分子也发生部分变性,从而导致SPI膜的拉伸性能大大降低。另外,对SPI进行预热处理,降低了TG的催化聚合反应,变性后的SPI膜拉伸性能大大降低。

姜燕等人<sup>[15]</sup>研究了TG对SPI成膜性能的影响,研究表明,将质量分数为50 g/L的SPI和体积分数为3%的甘油溶于pH值为8.0的Tris-HCl缓冲溶液中,当TG的添加量为4 U/g SPI时,SPI膜的抗拉强度增加了16.7%,表面疏水性增加了39.2%,水分含量、断裂伸长率、透光率和总可溶性物质含量明显降低,对水蒸气透过率影响不大。

### 2.1.2 谷朊粉膜

谷朊粉是从小麦(面粉)中提取出来的天然蛋白质,与SPI类似,由多种氨基酸组成,是营养丰富的植物蛋白资源,具有良好的黏性、弹性、延伸性、成膜性和吸脂性。

TG通过改性谷朊粉蛋白质分子,从而改善其功能特性。TG可使谷朊粉在分子间和分子内生成共价键,其中,分子间的共价键可形成相对分子量较大的聚合物。其作用机理是以谷朊粉蛋白肽链上的谷氨酰胺残基的γ-羟基酰胺基为乙酰基供体,以多肽链中赖氨酸残基的ε-氨基为酰基受体时,蛋白质在分子间或分子内形成ε-(γ-glutamyl)Lys共价键,从而使蛋白质之间形成紧密的网状结构,有效改善膜的功能特性<sup>[16]</sup>。

陈海英<sup>[16]</sup>研究了TG改性谷朊粉,结果表明,经TG改性的谷朊粉,其分子量变大。贾光锋<sup>[17]</sup>研究了转谷氨酰胺酶对改善谷朊粉的凝胶特性的影响,结果表明,当谷朊粉的质量分数为20%、TG添加量为7~9 U/g谷朊粉、pH值为2.5~3.5时,并于30~40℃条件下,反应1~2 h后,形成的谷朊粉凝胶质量较好。

王翀等人<sup>[18]</sup>以甘油为增塑剂,并以SPI和谷朊粉复合膜的透过率、拉伸强度、撕裂强度、水分含量、水蒸气透过率为指标,运用综合评分法,研究了TG对SPI和谷朊粉复合膜性能的影响。研究表明,当TG添加质量分数为0.30%时,复合膜的综合评分最高,为29.52。此时,与对照组相比,拉伸强度最大,为56.44 MPa,提高了47.1%;撕裂强度最大,为206.61 N/mm,提高了4.3%;水分质量分数为12.90%,降低了7.0%;水蒸气透过率为0.443 g·mm/(kPa·h·m<sup>2</sup>),降低了12.7%;复合膜的透光率略有降低。

### 2.1.3 花生分离蛋白膜

花生分离蛋白(peanut protein isolate, PPI)是一

种优质的植物蛋白,是制备绿色包装薄膜的优质原材料之一。PPI为球状蛋白,其自身的抗拉强度较低,经TG处理后,其抗拉强度和断裂伸长率可得到明显改善<sup>[19]</sup>。

姜燕等人<sup>[20]</sup>研究了TG对PPI膜的溶解特性和体外消化率2种性能的影响。结果表明,TG使PPI膜的水分含量及总可溶性物质质量降低,并降低了膜的溶解度;TG可降低膜的消化率,TG与蛋白质交联越多,消化率越低。

#### 2.1.4 玉米蛋白膜

与其他蛋白类生物包装膜一样,玉米蛋白膜也是一种在自然环境下可由微生物作用分解为葡萄糖、最后代谢为水和二氧化碳的可降解材料<sup>[21]</sup>。玉米蛋白的阻隔性能比其他蛋白质膜好,用谷物玉米蛋白制成的膜已被成功应用于糖果和坚果产品的可食性包装或涂膜材料<sup>[22]</sup>。

TG可提高玉米蛋白膜的透光性,并降低其凝沉性。王富盛等人<sup>[23]</sup>研究了中性蛋白酶、谷氨酰胺转氨酶、普鲁兰酶和葡萄糖氧化酶复合作用于玉米粉后,对其黏弹性和延展性的影响。结果表明,单种酶对玉米粉的改性程度有限,而多种酶复合改性使玉米粉的黏度、延展性、恢复性分别提高了359.0%、176.8%、295.9%。

玉米蛋白有水溶蛋白、醇溶蛋白、酸溶蛋白、盐溶蛋白,其中,玉米醇溶蛋白因其原材料来源广泛、易成膜的特点被广泛应用。玉米醇溶蛋白膜中肽主链上的羟基与亚氨基的氢键作用形成 $\alpha$ -螺旋体,从而使其具有独特的成膜性<sup>[24]</sup>。玉米醇溶蛋白膜的阻隔性能强于其他植物蛋白膜,但机械性能和透明性较差。玉米醇溶蛋白膜还具有良好的阻湿性、阻油性、阻氧性、保香性、防静电性,对细菌可以起到一定的抑制作用,因此,玉米醇溶蛋白膜适用于食品保鲜包装及药品包装等领域。H. M. Lai等人<sup>[25]</sup>以树脂为基材、油酸为增塑剂,改性玉米醇溶蛋白膜,结果表明,膜的抗张强度提高了60%左右。

## 2.2 对动物蛋白膜性能的影响

### 2.2.1 明胶膜

明胶是水溶性蛋白质混合物,由皮肤、韧带、肌腱中的胶原经酸或碱部分水解或水中煮沸而产生,是营养不完全的蛋白质,含有18种氨基酸,具有优良的胶体保护性、表面活性、黏稠性、成膜性、悬乳性、缓冲性、浸润性、稳定性和水易溶性。

由于明胶是线性蛋白,在不添加TG时也具有比其他大多数蛋白更高的抗拉强度。姜燕等人<sup>[19]</sup>研究了TG对食物蛋白质成膜性能的影响,结果表明,与

对照组相比,经TG处理后的明胶膜,其抗拉强度提高了25.6%。L. Mariniello等人<sup>[26]</sup>研究发现,在酶催化作用下,蛋白质分子适度的共价交联可提高膜的抗拉强度。丁克毅等人<sup>[27]</sup>研究了转谷氨酰胺酶改性明胶可食性薄膜的制备,结果表明,TG添加量为16 U/g明胶时,明胶膜的抗拉强度为4.92 MPa,是对照组的2.7倍,韧性为6.45 J/cm<sup>2</sup>,是对照组的3.1倍。TG提高蛋白膜抗拉强度的大小可能取决于谷氨酰胺残基和赖氨酸残基的数量以及TG接近它们的难易程度<sup>[19]</sup>。

与对照组相比,经TG处理后的明胶膜透光率略有降低,可能是因为TG催化蛋白质交联和聚集使成膜溶液更加浑浊;表面疏水性提高,可能是因蛋白质中更多的疏水核心或基团暴露出来<sup>[19]</sup>。Tang C. H.等人<sup>[28]</sup>研究发现,在TG诱导SPI絮凝和凝胶试验中,球蛋白的碱性亚基和伴球蛋白的 $\beta$ -亚基的疏水相互作用是SPI形成絮凝和凝胶的主要原因之一。

经TG改性,可提高明胶膜的断裂伸长率。C. Larré等人<sup>[29]</sup>研究发现,经TG处理,可同时提高脱酰胺谷蛋白膜的抗拉强度和断裂伸长率;而H. Babin等人<sup>[30]</sup>研究发现,TG的交联作用降低了明胶基质的流动性,阻止了明胶分子复性形成三螺旋结构,在聚合物纤维形成上造成了定向损失,从而降低了膜的断裂伸长率。导致两者研究结果不同的原因可能是具体的试验条件不同,如果添加酶的活性、量、作用时间、温度、pH值等试验条件一致并且适宜,TG适度的交联作用可提高膜的断裂伸长率。丁克毅等人<sup>[27]</sup>研究发现,TG添加量为16 U/g明胶时,明胶膜的断裂伸长率有较大提高。

葛晓军<sup>[31]</sup>研究了鱼皮明胶膜的性能,结果表明,经TG改性或者壳聚糖和TG复合改性后,鱼皮明胶膜的力学性能、水蒸气透过率得以显著改善。与空白对照组相比,经壳聚糖与TG复合改性后,明胶膜的水蒸气透过率降低了33.3%,抗拉强度、断裂伸长率提高了2.78倍和2.09倍,分别达51.69 MPa和38.35%,达到了GB 10457—2009《食品用塑料自粘保鲜膜》的标准水平。

### 2.2.2 乳清蛋白膜

乳清蛋白浓缩物(whey protein concentrate, WPC)是一种几乎存在于所有哺乳动物乳汁中的蛋白质,被称为“蛋白之王”,具有较好的溶解性、持水性、吸水性、成胶性、黏合性、弹性等性能。WPC是球状蛋白,自身抗拉强度较低,经TG处理后,其机械性能有所提高,但对抗拉强度影响不大,与对照组相比,其抗拉强度仅提高了2.2%,可能是因为WPC不是TG的适合底物<sup>[19]</sup>。据报道,WPC不是TG

的适合底物,它只有在还原剂存在条件下才能被 TG 催化<sup>[32-33]</sup>。

与花生分离蛋白相似, TG 催化蛋白质发生交联,使部分氨基酸残基不能通过氢键吸收水分,从而使得 WPC 膜的水分含量下降,同时降低了膜的溶解度<sup>[20]</sup>。

目前,由于 WPC 的生产成本较高,所以要实现 TG 改性 WPC 膜的工业化生产具有一定难度。

### 3 结语

物理(微波、超声波、高压、氮气、涂布复合、混溶复合)、化学(酸碱处理)、酶法(TG)都可以改善蛋白膜的功能特性,酶法改性是一种温和、高效且较为常见的改性方法。随着 TG 生产工艺的不断成熟,酶的制备成本不断下降, TG 改性各种蛋白膜的应用越来越广泛。目前, TG 对蛋白膜阻湿性能、机械性能的改善尚不够理想,因此,通过蛋白膜和其他材料(如聚乙烯醇)复合,可使复合膜具有某些特殊性能,从而满足不同的需要,这将成为可降解性膜未来的研究趋势之一。

#### 参考文献:

- [1] 汪学荣, 阚建全, 汪水平. 可食性大豆分离蛋白膜的制膜工艺研究[J]. 食品科学, 2008, 29(5): 153-158.  
Wang Xuerong, Kan Jianquan, Wang Shuiping. Study on Filming Technology for Edible Soy Protein Isolated Film[J]. Food Science, 2008, 29(5): 153-158.
- [2] 陈公安, 崔永岩. 大豆蛋白质塑料耐水性能改善的研究进[J]. 塑料, 2006, 35(2): 93-97.  
Chen Gong'an, Cui Yongyan. Improvement of Water Barrier Property of Soy Protein Plastics[J]. Plastics, 2006, 35(2): 93-97.
- [3] Motoki M, Seguro K. Transglutaminase and Its Use for Food Processing[J]. Trends in Food Science & Technology, 1998, 9(5): 204-210.
- [4] Lee H G, Lanier T C, Hamann D D, et al. Transglutaminase Effects on Low Temperature Gelation of Fish Protein Sols[J]. Journal of Food Science, 1997, 62(1): 20-24.
- [5] Ando H, Adachi M, Umeda K, et al. Purification and Characteristics of a Novel Transglutaminase Derived From Microorganisms[J]. Agricultural and Biological Chemistry, 1989, 53: 2613-2617.
- [6] 邵 虎, 陶红军, 黄亚东, 等. 谷氨酰胺转氨酶的研究进展[J]. 中国酿造, 2010(6): 9-12.  
Shao Hu, Tao Hongjun, Huang Yadong, et al. Research Advance of Transglutaminase[J]. China Brewing, 2010(6): 9-12.
- [7] 王书平, 刘俊华. 谷氨酰胺转氨酶的研究进展[J]. 湖南农业科学, 2010(15): 41-43.  
Wang Shuping, Liu Junhua. Research Progress of Transglutaminase[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2010(15): 41-43.
- [8] Seguro K, Nio N, Motoki M. Some Characteristics of a Microbial Protein Cross-Linking Enzyme: Transglutaminase[J]. ACS Symposium Series, 1996, 650: 271-280.
- [9] Motoki M, Kumazawa Y. Recent Research Trends in Transglutaminase Technology for Food Processing[J]. Food Science and Technology Research, 2000, 6(3): 151-160.
- [10] 范雪荣, 王 强, 王 平, 等. 可用于纺织工业清洁生产新型酶制剂[J]. 针织工业, 2011(5): 29-33.  
Fan Xuerong, Wang Qiang, Wang Ping, et al. Introduction of the New Type Enzymes Used in the Textile Clean Production[J]. Knitting Industries, 2011(5): 29-33.
- [11] 张子德, 陈志周, 于志彬, 等. 可食性大豆分离蛋白成膜工艺研究[J]. 中国食品学报, 2005, 5(4): 17-21.  
Zhang Zide, Chen Zhizhou, Yu Zhibin, et al. Study on Film Forming Technology of Edible Soy Protein Isolate[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2005, 5(4): 17-21.
- [12] 王 昊, 张东杰. 酶法改性大豆分离蛋白成膜条件的研究[J]. 农产品加工: 学刊, 2011(1): 57-61, 70.  
Wang Hao, Zhang Dongjie. Enzymatic Modification of Film Conditions of Soy Protein Isolate[J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2011(1): 57-61, 70.
- [13] 张春红, 郭 永, 赵秋伟, 等. 谷氨酰胺转氨酶对大豆分离蛋白改性机理的研究[J]. 粮油加工与食品机械, 2004(9): 42-43, 47.  
Zhang Chunhong, Guo Yong, Zhao Qiuwei, et al. Study on Modification Mechanism of the Transglutaminase on Soy Protein Isolate[J]. Machinery for Cereals, Oil and Food Processing, 2004(9): 42-43, 47.
- [14] 胡 坤, 萧兆荣, 陈学敬. 谷氨酰胺转氨酶对大豆分离蛋白塑料拉伸性能的影响[J]. 食品与发酵工业, 2008, 34(6): 6-10.  
Hu Kun, Xiao Zhaorong, Chen Xuejing. Study of the Effects of Microbial Transglutaminase on the Tensile Properties of Soy Protein Plastic[J]. Food and Fermentation Industries, 2008, 34(6): 6-10.
- [15] 姜 燕, 温其标, 唐传核, 等. 谷氨酰胺转移酶对大豆分离蛋白成膜性能的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2006, 25(4): 24-28.  
Jiang Yan, Wen Qibiao, Tang Chuanhe, et al. Effects of Transglutaminase on Properties of Soy Protein Isolates Cast Films[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2006, 25(4): 24-28.
- [16] 陈海英. 谷氨酰胺转氨酶改性谷朊粉及其机理的研究[D].

- 沈阳: 沈阳农业大学, 2006.
- Chen Haiying. Transglutaminase-Modified Wheat Gluten and Its Mechanism[D]. Shenyang: Agricultural University of Shenyang, 2006.
- [17] 贾光锋. 微生物转谷氨酰胺酶改善谷朊粉凝胶特性研究[J]. 粮食与饲料工业, 2007(5): 16-18.
- Jia Guangfeng. Studies on Improvement in Gelling Characteristics of Vital Wheat Gluten by Transglutaminase[J]. Cereal & Feed Industry, 2007(5): 16-18.
- [18] 王 翀, 张春红, 赵前程, 等. 谷氨酰胺转氨酶改性可食性复合膜的研究[J]. 粮食与饲料工业, 2009(5): 23-25.
- Wang Chong, Zhang Chunhong, Zhao Qiancheng, et al. Studies on Transglutaminase Treatment Improving Properties of Edible Composite Films[J]. Cereal & Feed Industry, 2009(5): 23-25.
- [19] 姜 燕, 温其标, 唐传核, 等. 谷氨酰胺转移酶对食物蛋白质成膜性能的影响[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2006, 34(8): 110-115.
- Jiang Yan, Wen Qibiao, Tang Chuanhe, et al. Effect of Transglutaminase on Properties of Cast Films from Food Proteins[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2006, 34(8): 110-115.
- [20] 姜 燕, 唐传核, 温其标, 等. 酶法改性对各种蛋白膜的溶解特性和体外消化率的影响[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(3): 71-74.
- Jiang Yan, Tang Chuanhe, Wen Qibiao, et al. Effect of Transglutaminase Modification on the Solubility and Digestibility in Vitro of Several Protein Films[J]. Food and Fermentation Industries, 2009, 35(3): 71-74.
- [21] Maurizio A, Jan J De Vlieger, Maria E E, et al. Biodegradable Starch/Clay Nanocomposite Films for Food Packaging Applications[J]. Food Chemistry, 2005, 93(3): 467-474.
- [22] Krochta J M. Proteins As Raw Materials for Films and Coatings: Definitions, Current Status, and Opportunities[M]. FL: CRC Press, 2002.
- [23] 王富盛, 刘景圣. 多酶复合对玉米粉质构特性的影响[J]. 中国食物与营养, 2012, 18(3): 49-53.
- Wang Fusheng, Liu Jingsheng. Influence of Texture Properties of Corn Flour by Multienzyme[J]. Food and Nutrition in China, 2012, 18(3): 49-53.
- [24] 田少君, 闫景坤, 阎 静. 不同增塑剂对玉米醇溶蛋白膜机械性能的影响[J]. 粮油加工, 2006(8): 88-90.
- Tian Shaojun, Yan Jingkun, Yanjing. Zein Different Plasticizers on the Mechanical Properties of Films[J]. Cereals and Oils Processing, 2006(8): 88-90.
- [25] Lai Huey-Min, Graciela W P. Properties and Microstructure of Plasticized Zein Films[J]. Cereal Chemistry, 1997, 74(6): 771-775.
- [26] Mariniello L, Pierro P D, Esposito C, et al. Preparation Andmechanical Properties of Edible Pectin-Soy Flour Films Obtained in the Absence or Presence of Transglutaminase[J]. Journal of Biotechnology, 2003, 102(2): 191-198.
- [27] 丁克毅, 刘 军, Eleanor M Brown, 等. 转谷氨酰胺酶(mTG)改性明胶可食性薄膜的制备[J]. 食品与生物技术学报, 2006, 25(4): 1-4.
- Ding Keyi, Liu Jun, Eleanor M Brown, et al. Edible Films Prepared from Microbial Transglutaminase Modified Gelatins[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2006, 25(4): 1-4.
- [28] Tang C H, Wu H, Yu H P, et al. Coagulation and Gelation of Soy Protein Isolates Induced by Microbial Transglutaminase[J]. Journal of Food Biochemistry, 2006, 30(1): 35-55.
- [29] Larré C, Desserme C, Barbot J, et al. Properties of Deamidated Gluten Films Enzymatically Cross-Linked[J]. Journal of Agriculture and Chemistry Food, 2000, 48(11): 5444-5449.
- [30] Babin H, Dickinson E. Influence of Transglutaminase Treatment on the Thermoreversible Gelation of Gelatin[J]. Food Hydrocolloids, 2001, 15(3): 271-276.
- [31] 葛晓军. 鱼皮明胶的壳聚糖与酶法复合改性及其膜性能研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- Ge Xiaojun. Studies on Fish Gelatin Modified with Transglutaminase and Chitosan and Their Film-Forming Properties[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011.
- [32] Aboumahmoud R, Savello P. Crosslinking of Whey Protein by Transglutaminase[J]. Journal of Dairy Science, 1990, 73(2): 256-263.
- [33] Traore F, Meunier J C. Crosslinking Activity of Placental F XIIIa on Whey Proteins and Caseins[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 1992, 40: 399-402.

(责任编辑: 徐海燕)