

# 均匀试验法优化褐藻胶-乳清分离蛋白 可食性膜的工艺

梁雯雯<sup>1</sup>, 郭建<sup>1</sup>, 汪秋宽<sup>1</sup>, 任丹丹<sup>1</sup>, 袁瑞<sup>2</sup>, 刘舒<sup>1</sup>, 杨滢淼<sup>3</sup>, 丛海花<sup>1\*</sup>

(1. 大连海洋大学 食品科学与工程学院, 大连 116023; 2. 中国水产科学研究院东海研究所, 上海 200090;  
3. 大连海洋大学 中新合作学院, 大连 116023)

**摘要:** **目的** 制备褐藻胶-乳清分离蛋白可食性膜并对其工艺条件进行优化。**方法** 以褐藻胶(sodium alginate, SA)和乳清分离蛋白(whey protein isolate, WPI)为主要原料, 甘油为增塑剂制得可食性膜。以溶胶温度、溶胶时间、SA和WPI浓度、钙化时间、钙离子浓度、甘油浓度、超声时间为因素进行均匀试验, 考察指标为溶胶黏度、膜的厚度、透光率、拉伸强度。**结果** 可食性膜性能受WPI浓度、溶胶温度、溶胶时间、钙化时间、超声时间的影响较大, 基本不受SA浓度、钙离子浓度和甘油浓度影响, 所确定的最佳配比及工艺条件为: SA浓度1.1%、WPI浓度5.5%、溶胶温度65℃、溶胶时间105 min、钙化时间12 min、钙离子浓度1.1%、甘油浓度3.4%和超声时间30 min。**结论** 该工艺条件下制备的褐藻胶-乳清分离蛋白可食性膜性能较好, 需进一步验证SA浓度、钙离子浓度和甘油浓度的影响。

**关键词:** 褐藻胶; 乳清分离蛋白; 可食性膜; 工艺优化; 均匀试验

## Optimization of the process of sodium alginate-whey protein isolate edible film by uniform experimental method

LIANG Wen-Wen<sup>1</sup>, GUO Jian<sup>1</sup>, WANG Qiu-Kuan<sup>1</sup>, REN Dan-Dan<sup>1</sup>, YUAN Rui<sup>2</sup>,  
LIU Shu<sup>1</sup>, YANG Yu-Miao<sup>3</sup>, CONG Hai-Hua<sup>1\*</sup>

(1. College of Food Science and Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China;  
2. East China Sea Fishery Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai 200090, China;  
3. College of China-Newzealand Collaboration, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

**ABSTRACT: Objective** To prepare the alginate-whey protein isolate edible film and optimize the preparation process. **Methods** Edible films were developed on the base of sodium alginate (SA) and whey protein isolate (WPI), and glycerol was added as plasticizer. The uniform test was carried out by taking sol temperature, glue melting time, concentrations of SA and WPI, calcification time, calcium ion concentration, glycerol concentration and the ultrasonic time as factors, and the indexes were viscosity of the mixture, thickness, transmittance, tensile strength of the films through uniform design. **Results** The properties of edible film were significantly affected by WPI concentration, sol temperature, glue melting time, calcification time and ultrasonic time, and not affected by

基金项目: 海藻活性物质国家重点实验室开放基金项目(SKL-BASS1716)、辽宁省大学生创新训练项目(201610158056, 201810158146)

**Fund:** Supported by the State Key Laboratory of Bioactive Seaweed Substances (SKL-BASS1716), Innovation training program for college students in liaoning province (201610158056, 201810158146)

\*通讯作者: 丛海花, 博士, 副教授, 主要研究方向为水产品热加工新技术及海藻活性物质。E-mail: 287669592@qq.com

\*Corresponding author: CONG Hai-Hua, Ph.D, Associate Professor, College of Food Science and Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China. E-mail: 287669592@qq.com

alginate, calcification and glycerol concentration. The optimum ratio and technological conditions were as follows: alginate concentration was 1.1%, WPI concentration was 5.5%, sol temperature was 65 °C, glue melting time was 105 min, calcification time was 12 min, calcification concentration was 1.1%, glycerol concentration was 3.4% and ultrasonic time was 30 min. **Conclusion** The edible film of SA-WPI has good mechanical properties, and influences of concentration of SA, calcification and glycerol should be further investigated.

**KEY WORDS:** sodium alginate; whey protein isolate; edible film; process optimization; uniform design

## 1 引言

随着人们环保意识的增强, 大众对食品包装材料的要求上升到了绿色环保的新高度, 食品包装材料的不可食性和难降解性既造成严重污染又浪费资源。可食用膜可以减少变性、避免水分流失和降低不良的化学反应速率, 也可以防止食品变质和微生物污染, 在食品的质量、安全、运输、储存等过程中发挥着重要的作用<sup>[1]</sup>, 同时可食用膜还可以在不使用防腐剂的情况下延长食品保质期, 改善食品质量<sup>[2]</sup>, 达到绿色、环保、健康的要求。

蛋白质因其良好的成膜性和营养价值在可食性包装材料领域受到了很多学者的关注, 其优势在于柔软性、阻油性和隔氧性良好, 并且不易溶于水, 可以作为疏水材料用在医药、食品领域<sup>[3]</sup>。可食性膜的蛋白质类物质主要包括玉米蛋白、大豆蛋白和胶原蛋白等, 玉米醇溶蛋白水蒸气透过率低<sup>[4]</sup>, 大豆蛋白膜机械性能和热封性都不理想<sup>[5]</sup>, 胶原蛋白膜阻氧性随环境相对湿度增加会降低<sup>[6]</sup>等, 而以乳清为原料经过过滤、浓缩等操作得到乳清浓缩蛋白经过进一步工艺处理得到的乳清分离蛋白(whey protein isolate, WPI)<sup>[7]</sup>, 因其优异的阻隔性<sup>[8]</sup>、可食用性、生物降解性等机械性能已被广泛应用<sup>[9]</sup>。单一组分的天然高分子材料制备的膜力学性能、阻湿性能较差<sup>[10]</sup>, 因此通过与其他成膜材料优势互补可使膜的性能有一定提高。由于是单层亲水性膜结构<sup>[11]</sup>, 与单独组分膜<sup>[12]</sup>相比发现褐藻胶(sodium alginate, SA)复合膜的力学性能更加优越<sup>[13]</sup>。海藻酸钠具有较好的成膜性能<sup>[14]</sup>, 李磊等<sup>[15]</sup>比较了 1%浓度的海藻酸钠、羧甲基纤维素、羧甲基纤维素钠、淀粉和壳聚糖等的水蒸气透过率, 发现 1%浓度下海藻酸钠膜是水蒸气透过率最小的多糖膜。单一海藻酸钠制作的膜的韧性、拉伸性不够, 需要添加适量的增塑剂、增稠剂可以提升可食性膜的性能<sup>[16]</sup>。甘油是乳清蛋白膜中最好的一种增塑剂<sup>[17]</sup>, Ramosò 等<sup>[18]</sup>研究了分离乳清蛋白和浓缩乳清蛋白加入不同量甘油后对可食性薄膜性能的影响。Wang 等<sup>[19]</sup>研究发现 WPI 对拉伸强度的影响最大, SA 则对伸长率产生最显著的影响。

本研究通过均匀试验法优化筛选 SA-WPI 可食性膜的工艺条件, 考察溶胶黏度、制成膜的拉伸强度、厚度、透光率, 以期为进一步开发可食性包装材料奠定基础。

## 2 材料与方法

### 2.1 材料与仪器

褐藻胶(食品级, 青岛明月有限公司); 乳清分离蛋白 WPI90(食品级, 郑州皇朝化工制品有限公司); 无水氯化钙(分析纯, 西陇化工股份有限公司); 甘油(食品级, 广州市大工嘉翰林化工有限公司)。

101-2-BS 电热恒温鼓风干燥箱(上海跃进医疗器械厂); BCD-216F TB 海尔电冰箱(青岛海尔集团); HWS26 电热恒温水浴锅(上海恒科技有限公司); 79-2 双向磁力加热搅拌器(上海禾影仪器有限公司); 721 可见分光光度计(上海光谱仪器有限公司); KJ-600 超声波发生器(无锡市科杰超声电子设备有限公司); AL204 电子天平(常熟市双杰测试仪器有限公司); TMS-PRO 型质构仪(美国 Food Technology Corporation); RVDV-II+P 黏度仪(美国博力飞仪器有限公司); 702-1 型千分尺(美国 APEX 世达工具有限公司)。

### 2.2 SA-WPI 可食性膜的制备

按照以下流程制备可食性膜: 溶胶→搅拌→脱气→倒胶→一次干燥→钙化→二次干燥→可食性膜。

分别配制 SA 和 WPI 溶液, 充分溶解后向溶胶中加入一定量的甘油, 置于水浴锅中恒温加热并不断搅拌; 搅拌后对溶胶进行脱气, 静置过夜; 取 20 g 溶胶倒入尺寸一致表面光滑的平板中, 于 50 °C 下干燥 12 h; 在干燥后的膜中倒入一定浓度的氯化钙溶液, 一段时间倒掉氯化钙溶液后于 50 °C 下干燥 6 h。

### 2.3 试验方法

#### 2.3.1 试验设计

以 SA 浓度、WPI 浓度、溶胶温度、溶胶时间、钙化时间、钙离子浓度、甘油浓度、脱气时间为试验因素, 分别为  $X_1$  至  $X_8$ , 以溶胶黏度、膜的厚度、拉伸强度和透光率为指标。试验的因素水平较多, 为了节省试验次数, 较快获得能反映这 4 个指标的显著影响因素, 按表 1 进行均匀试验。

#### 2.3.2 溶胶黏度的测定

胶液制好后使用黏度计进行溶胶黏度测定, 选取 4 号转子以 100 r/min 转速测定。

#### 2.3.3 膜厚度测量

选择平整均匀的膜, 裁剪尺寸为 20 mm×50 mm, 选

取 5 个点测量, 测量结果取平均值。

### 2.3.4 拉伸强度测定

根据 GB/T 16421-1996<sup>[20]</sup>, 将膜尺寸裁剪为 20 mm×50 mm, 质构仪参数: 使用 1000 N 的传感器, 起始力 800 N, 初始夹距设为 40 mm, 拉引速率设定为 60 mm/min, 样品距离为 20 mm。拉

伸强度(tensile strength, TS)值的计算公式如下:

$$TS = \frac{F}{a \times b}$$

式中: TS——拉伸强度, MPa;  $F$ ——最大拉伸力, N;  $a$ ——样品膜的厚度, mm;  $b$ ——样品膜的宽度, mm。

表 1 蛋白源可食用膜均匀试验设计表  $U^*_{10}(10^8)$   
Table 1 Edible membrane uniformity test with protein source  $U^*_{10}(10^8)$

SA 浓度/%	WPI 浓度/%	溶胶温度/°C	溶胶时间/min	钙化时间/min	钙离子浓度/%	甘油浓度/%	超声时间/min
1.1	6.0	58	75	20	1.7	4.8	30
1.2	7.0	61	95	30	1.3	4.4	28
1.3	8.0	64	60	18	2.0	4.0	26
1.4	9.0	56	80	28	1.6	3.6	24
1.5	10.0	59	100	16	1.2	3.2	22
1.6	5.5	62	65	26	1.9	5.0	20
1.7	6.5	65	85	14	1.5	4.6	18
1.8	7.5	57	105	24	1.1	4.2	16
1.9	8.5	60	70	12	1.8	3.8	14
2.0	9.5	63	90	22	1.4	3.4	12

### 2.3.5 透光率测定

根据袁瑞等<sup>[21]</sup>将膜裁成尺寸为 40 mm×10 mm 的长条, 贴在比色皿一侧, 在 500 nm 下测定其吸光度, 以空皿做空白, 透光率的计算公式如下:

$$T = (0.1)^A \times 100\%$$

式中:  $T$ ——透光率, %;  $A$ ——吸光度。

## 2.4 数据处理方法

使用 Excel 软件采用回归分析法对试验结果进行分析。

## 3 结果与分析

根据均匀试验结果表 2, 结合试验设计表 1, 可以看出可食性膜的厚度随着 SA 和 WPI 浓度的增加而增大。在保证机械强度和透光率的情况下, 可食性膜的厚度越小越有市场优势。溶胶黏度随着 SA 和 WPI 的浓度的增加总体上呈现增大趋势, 但甘油使溶胶内部整体的流动性提高, 使各组分可以更好地交联, 溶胶内的 SA 和 WPI 可以形成愈发复杂的复合网状结构, 这些复合网状结构堆叠起来, 使整体薄膜的吸光度上升, 从而使薄膜的透光率下降。拉伸强度主要受增塑剂影响, 甘油浓度较低时, 制成的薄膜的柔软度较低, 但韧性较好, 因此表现出来的拉伸强度较高, 但当甘油加入的浓度上升时, 整个薄膜的柔软度和弹

性都大大上升, 但这样使薄膜的机械性能大大下降, 拉伸强度大大降低。随着 SA 和 WPI 浓度的增加, 整个溶胶变得十分粘稠, 这样容易在溶胶的内部出现一些小气泡、小孔和小洞。在通过钙化、干燥之后, 这些小气泡和孔洞仍然存在, 这些因素使整个薄膜的拉伸强度下降。

表 2 均匀试验结果( $n=3$ )  
Table 2 Uniformity test results ( $n=3$ )

	厚度/mm	溶胶黏度/cp	透光率/%	拉伸强度/MPa
1	0.302±0.021	151.0	56.1±1.4	1.46±0.08
2	0.322±0.026	224.0	54.6±1.8	1.33±0.05
3	0.334±0.033	318.0	54.5±1.9	0.99±0.08
4	0.348±0.037	472.2	51.4±2.1	0.95±0.04
5	0.341±0.035	554.6	51.2±2.3	0.77±0.03
6	0.352±0.041	724.1	50.5±1.7	0.64±0.06
7	0.342±0.032	796.0	48.1±1.9	0.66±0.07
8	0.354±0.036	874.6	48.8±1.5	0.75±0.05
9	0.37±0.038	989.4	46.9±1.8	0.65±0.06
10	0.391±0.032	1103.1	47.8±2.0	0.65±0.09

假设已知指标厚度、溶胶黏度、透光率、拉伸强度与试验因素之间满足线性关系, 利用 Excel 对上述结果进行回归分析, 得到回归方程可以分别写为:

$$Y_{\text{膜厚度}}=0.363+0.0058X_2+0.0005X_3-0.00045X_4+0.00122X_5-0.0039X_8 \quad (\text{式 } 1)$$

$$Y_{\text{溶胶黏度}}=2008-8.89X_2-2.10X_3-0.495X_4+0.7363X_5-55.54X_8 \quad (\text{式 } 2)$$

$$Y_{\text{膜透光率}}=33.9+0.127X_2+0.082X_3-0.0055X_4+0.045X_5+0.51X_8 \quad (\text{式 } 3)$$

$$Y_{\text{膜拉伸强度}}=0.373-0.0136X_2-0.0081X_3+0.0025X_4+0.00068X_5+0.0422X_8 \quad (\text{式 } 4)$$

由 4 种指标的复相关系数  $r$ (膜厚度 0.998、溶胶黏度 0.99、膜透光率 0.97、膜拉伸强度 0.89)对偏回归系数进行  $t$  检验时,  $|t|$  越大, 所对应的偏回归系数越显著, 相应的因数也越重要, 由上表结果, 可以确定主次顺序为  $X_2 > X_5 > X_4 > X_8 > X_3$ 。  $P > 0.05$  对应的回归系数不明显, 并到残差中。简化方程得到:

$$Y_{\text{膜厚度}}=0.363+0.0058X_2-0.00045X_4+0.00122X_5 \quad (\text{式 } 5)$$

$$Y_{\text{溶胶黏度}}=2008-8.89X_2-2.10X_3-0.495X_4 \quad (\text{式 } 6)$$

$$Y_{\text{膜透光率}}=33.9+0.127X_2+0.082X_3+0.045X_5+0.51X_8 \quad (\text{式 } 7)$$

$$Y_{\text{膜拉伸强度}}=0.373-0.0136X_2-0.0081X_3+0.00068X_5+0.0422X_8 \quad (\text{式 } 8)$$

可食性膜性能基本不受 SA 浓度、钙离子浓度和甘油浓度影响, Leuangsukrerak 等<sup>[22]</sup>也发现甘油的含量范围对膜的性能没有明显影响。由式 5 可以看出: WPI 浓度和钙化时间这 2 个因素前的系数为正, 表明膜厚度随着两者的增加而增加。而溶胶时间因素前的系数是负值, 说明膜厚度随其增大而减小。在确定最优方案时 WPI 浓度和钙化时间应取偏下限值, 膜厚度越小越好, 即 5.5% 和 12 min, 而溶胶时间应取偏上限值, 即 105 min。其他因素可以考虑其他试验指标继续确定; 由式 6 可以看出: 溶胶黏度随 WPI 浓度、溶胶时间和溶胶温度增大而减小。在确定最优方案时 WPI 浓度、溶胶时间和溶胶温度应取偏上限值即 10%, 105 min 和 65 °C。其他因素可以针对溶胶温度忽略; 由式 7 可以看出: 膜透光率随 WPI 浓度、溶胶温度、钙化时间和超声时间增大而增大。膜透光率越大越好, 应取偏上限值, 即 5.5%、65 °C、30 min 和 30 min。Harper 等<sup>[23]</sup>发现添加蛋白质对海藻酸盐薄膜的力学性能和光学性能均有影响, 蛋白质的加入也影响了膜的透明度。Hongsprabhas 等<sup>[24]</sup>在研究中发现未加热的乳清蛋白制得的膜呈非常透明的状态, 但钙的浓度相当高, 发现加热的乳清蛋白膜是最不透明的, 钙浓度的增加会增加凝胶中蛋白质的团聚体大小, 较大的乳清蛋白聚集体会再薄膜中散射更多的光, 使薄膜呈现白色。其他因素可以针对膜透光率忽略; 由式 8 可以看出: 膜拉伸强度随 WPI 浓度和溶胶温度增大而减小, 随钙化时间和超声时间增大而增大。随着 SA 和 WPI 的浓度的提升, 易在溶胶中形成细小的洞, 导致成膜之后的拉伸强度大大下降。膜拉

伸强度越大越好, 因此 WPI 浓度和溶胶温度应取偏下限值即 5.5% 和 56 °C, 钙化时间和超声时间两因素应取偏上限值即 30 min 和 30 min。其他因素可以针对膜抗拉伸强度忽略。Wang 等<sup>[19]</sup>的研究表明, WPI 与 SA 混合对拉伸强度产生负面影响, 与本试验研究一致, WPI 浓度应取偏下限值。溶胶中甘油浓度的增加会使多肽链和蛋白质的交联程度下降, 会使薄膜的抗拉伸强度大大下降, 增塑剂降低了薄膜的机械和阻隔性能<sup>[25]</sup>, 应扩大甘油浓度的水平范围进一步研究。

## 4 结 论

SA-WPI 可食性膜的性能受 WPI 浓度, 溶胶温度, 溶胶时间, 钙化时间, 超声时间的影响较大。在本试验水平范围内 4 个指标基本不受 SA 浓度、钙离子浓度和甘油浓度影响, 从经济和生产成本角度考虑, SA 浓度、钙离子浓度和甘油浓度取偏下值。综合考虑所选配比为: WPI 浓度 5.5%, 溶胶温度 65 °C, 溶胶时间 105 min, 钙化时间 12 min, 超声时间 30 min。均匀试验结果进一步优化有利于知道可食用膜的生产工艺, 可以根据公式 5~8 对配方进行调整, 如包装材料需要膜的拉伸强度更高, 可以适当进一步减小 WPI 浓度, 增加钙化时间和脱气时间。进一步研究需扩大 SA 浓度、钙离子浓度和甘油浓度的水平范围, 并与单一膜的性能进行比较。

## 参考文献

- [1] Tavassoli-Kafrani E, Shekarchizadeh H, Masoudpour-Behabadi M. Development of edible films and coatings from alginates and carrageenans [J]. *Carbohydr Polym*, 2016, (137): 360–374.
- [2] Galus S, Kadzińska J. Food applications of emulsion-based edible films and coatings [J]. *Trend Food Sci Technol*, 2015, 45(2): 273–283.
- [3] Reddy N, Chen LH, Yang YQ. Thermoplastic films from peanut proteins extracted from peanut meal [J]. *Ind Crop Prod*, 2013, (43): 159–164.
- [4] Cho SY, Lee SY, Rhee C. Edible oxygen barrier bilayer film pouches from corn zein and soy protein isolate for olive oil packaging [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2010, 43(3): 1234–1239.
- [5] 崔和平, 鲁亚楠, 郭兴凤. 蛋白复合膜研究进展[J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2013, 34(3): 106–112.
- [6] Cui HP, Lu YN, Guo XF. Research progress on composite protein films [J]. *J Henan Univ Technol (Nat Sci Ed)*, 2013, 34(3): 106–112.
- [7] 贾祥祥, 郭兴凤. 可食性蛋白膜研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2011, (1): 5–8.
- [8] Jia XX, Guo XF. Research progress on edible protein films [J]. *J Cere Oils*, 2011, (1): 5–8.
- [9] 翟光超. 乳清蛋白研究进展[J]. *现代农业科技*, 2008, (21): 283–285.
- [10] Zhai GC. Research progress on whey protein [J]. *Mod Agric Sci Technol*, 2008, (21): 283–285.
- [11] Galus S, Kadzińska J. Whey protein edible films modified with almond and walnut oils [J]. *Food Hydrocoll*, 2016, (52): 78–86.
- [12] Perez LM, Piccirilli GN, Delorenzi NJ, *et al.* Effect of different combinations of glycerol and/or trehalose on physical and structural properties of whey protein concentrate-based edible films [J]. *Food*

- Hydrocoll, 2016, (56): 352–359.
- [10] 陈妮娜, 朱亚燕, 阳丽媛, 等. 海藻酸钠-果胶改性复合膜的制备及表征[J]. 中国食品添加剂, 2018, (4): 154–163.  
Chen NN, Zhu YY, Yang LY, *et al.* Preparation and characterization of cross-linking composite films based on sodium alginate and pomelo pectin [J]. *China Food Addit*, 2018, (4): 154–163.
- [11] 李晓辉, 贺煌煌. 褐藻胶制备肠溶空心胶囊性能改进方法[J]. 广州化工, 2017, 45(11): 30–32.  
Li XH, He HH. Performance improvement methods of alginate-based enteric capsules [J]. *Guangzhou Chem Ind*, 2017, 45(11): 30–32.
- [12] Lee HY, Chan LW, Dolzhenko A, *et al.* Influence of viscosity and uronic acid composition of alginates on the properties of alginate films and microspheres produced by emulsification [J]. *Microencapsul*, 2006, (23): 912–927.
- [13] Dong ZF, Wang Q, Du YM. Alginate/gelatin blend films and their properties for drug controlled release [J]. *Membr Sci*, 2006, (280): 37–44.
- [14] 蒋世全, 邓靖. 肉桂精油-海藻酸钠可食性抗菌膜的研制[J]. 包装学报, 2010, 2(4): 75–78.  
Jiang SQ, Deng J. Study on edible antimicrobial cinnamon oil-sodium alginate film [J]. *Packag J*, 2010, 2(4): 75–78.
- [15] 李磊, 牛坤, 马庆一. 可食性膜阻水特性的研究[J]. 食品科学, 2008, (2): 145–150.  
Li L, Niu K, Ma QY. Research on water vapor barrier properties of edible films [J]. *Food Sci*, 2008, (2): 145–150.
- [16] 范素琴, 王晓梅, 陈鑫炳, 等. 海藻酸钠在可食性肠衣膜中的应用研究[J]. 肉类工业, 2014, (8):34–37.  
Fan SQ, Wang XM, Chen XB, *et al.* Study on application of sodium alginate of edible casing film [J]. *Meat Ind*, 2014, (8): 34–37.
- [17] Osés J, Fernández-Pan I, Mendoza M, *et al.* Stability of the mechanical properties of edible films based on whey protein isolate during storage at different relative humidity [J]. *Food Hydrocoll*, 2009, (23): 125–131.
- [18] Ramosò L, Reinas I, Silva SI, *et al.* Effect of whey protein purity and glycerol content upon physical properties of edible films manufactured therefrom [J]. *Food Hydrocoll*, 2013, (30): 110–122.
- [19] Wang L, Auty AM, Kerry PJ. Physical assessment of composite biodegradable films manufactured using whey protein isolate, gelatin and sodium alginate [J]. *J Food Eng*, 2010, (9): 199–207.
- [20] GB/T 16421-1996 塑料拉伸性能小试样试验方法[S].  
GB/T 16421-1996 Plastics-Determination of tensile properties by use of small specimens [S].
- [21] 袁瑞, 丛海花, 汪秋宽, 等. 褐藻酸钠可食性膜制备工艺研究[J]. 水产科学, 2016, 35(06): 708–712.  
Yuan R, Cong HH, Wang QK, *et al.* Preparation procedures of edible sodium alginate film [J]. *Fish Sci*, 2016, 35(6): 708–712.
- [22] Leuangasukrer M, Phupoksakul T, Tananuwong K, *et al.* Properties of konjac glucomannane whey protein isolate blend films [J]. *LWT-Food Sci Technol*, 2014, (59): 94–100.
- [23] Harper BA, Barbut S, Lim LT, *et al.* Characterization of ‘wet’ alginate and composite films containing gelatin, whey or soy protein [J]. *Food Res Int*, 2013, (52): 452–459.
- [24] Hongsprabhas P, Barbut S. Structure-forming processes in Ca<sup>2+</sup>-induced whey protein isolate cold gelation [J]. *Int Dairy J*, 1997, (7): 827–834.
- [25] Karbowiak T, Hervet H, Léger L, *et al.* Effect of plasticizers (water and glycerol) on the diffusion of a small molecule in i-carragennan biopolymer films for edible coating application [J]. *Biomacromolecules*, 2006, (7): 2011–2019.

(责任编辑: 武英华)

## 作者简介



梁雯雯, 硕士, 主要研究方向为水产品加工。  
E-mail: lww159457@163.com



丛海花, 副教授, 主要研究方向为水产品热加工新技术及海藻活性物质。  
E-mail: 287669592@qq.com