

# 磷酸化海藻糖制备工艺优化及其活性评价

张小利, 祈雪儿, 姚 慧, 毛俊龙, 张 宾\*

(浙江海洋大学食品与医药学院, 舟山 316022)

**摘要:** **目的** 探究磷酸化海藻糖制备的最佳工艺参数, 并以冻藏南美白对虾为对象, 评价磷酸化海藻糖对冻藏虾仁水分保持特性的影响。**方法** 通过单因素实验和正交实验, 对海藻糖磷酸化制备条件进行优化设计, 考察磷酸化试剂配比、海藻糖浓度、反应温度和时间对磷酸化海藻糖对冻藏虾仁保水效果的影响。通过钼蓝比色法测定磷含量, 并利用红外光谱进行磷酸化海藻糖结构分析。**结果** 最佳磷酸化条件为磷酸盐配比(三聚磷酸钠:三偏磷酸钠)6:1, 海藻糖浓度 6%, 反应温度 90 °C 和反应时间 7 h。磷酸化条件对冷冻南美白对虾解冻损失率的影响强度依次为磷酸盐配比=海藻糖浓度=反应温度>反应时间。**结论** 在此条件下, 制备的磷酸海藻糖处理南美白对虾, 相比于单纯海藻糖处理, 虾仁解冻损失率更小, 磷酸化海藻糖中磷酸根含量为 11.68%。可为冷冻水产品低糖低磷保水剂生产与开发提供研究方向。

**关键词:** 正交优化; 磷酸化海藻糖; 解冻损失率; 南美白对虾

## Optimization of the preparation of phosphorylated trehalose and its activity evaluation

ZHANG Xiao-Li, QI Xue-Er, YAO Hui, MAO Jun-Long, ZHANG Bin\*

(College of Food and Medicine, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

**ABSTRACT: Objective** To explore the optimum process parameters for the preparation of phosphorylated trehalose, and with frozen south *Litopenaeus vannamei* as the object to evaluate the effect of phosphorylated trehalose on the water retention characteristics of frozen shrimp. **Methods** Phosphorylation conditions were optimized by single factor experiments and orthogonal experiments to evaluate the thawing loss rate of *Litopenaeus vannamei* by investigating the ratio of phosphorylation reagent, trehalose ratio, temperature and reaction time to the retention of phosphorylated trehalose. The phosphorus content was determined by molybdenum blue colorimetric method and the structure analysis was characterized by infrared spectroscopy. **Results** The optimal phosphorylation conditions were as follow: phosphoric acid ratio of 6:1, a trehalose concentration of 6%, a temperature of 90 °C, and a time of 7 h. The effect of phosphorylation conditions on the thawing loss rate of frozen *Litopenaeus vannamei* was phosphate ratio=trehalose concentration=temperature>time. **Conclusion** Under such conditions, the thawed loss rate of shrimp treated with trehalose phosphate is lower than that of pure trehalose treatment, and the phosphate root content in phosphorylated trehalose is 11.68%. The study can provide research direction for the production and development of low sugar and low phosphorus cryoprotective agents.

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(31871871)、浙江省自然科学基金项目(LY18C200008)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China (31871871), Natural Science Foundation of Zhejiang Province (LY18C200008)

\***通讯作者:** 张宾, 博士, 教授, 主要研究方向为水产品加工及贮藏。E-mail: zhangbin@zjou.edu.cn

\***Corresponding author:** ZHANG-Bin, Ph.D, Professor, College of Food and Medicine, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China. E-mail: zhangbin\_ouc@163.com

**KEY WORDS:** orthogonal optimization; phosphorylated trehalose; thawing loss rate; *Litopenaeus vannamei*

## 1 引言

南美白对虾(*Litopenaeus vannamei*)学名凡纳滨对虾,为对虾科对虾属甲壳类水产品,因其独特鲜美口感及低脂高蛋白的营养特性,深受消费者欢迎。2019 中国渔业统计年鉴显示,2018 年中南美白对虾的海水与淡水养殖产量分别达到 111.75 万吨和 64.28 万吨,其产量与 2017 年相比分别增加了 3.67 万吨和 5.13 万吨<sup>[1]</sup>,其中南美白对虾在虾类海水养殖中占比高达 79.3%,其已成为我国主要养殖虾种。但由于南美白对虾高蛋白高水分的特性,其在加工、贮藏期间易发生氧化、自溶现象,导致对虾营养价值与食用品质下降。

磷酸盐对于低温冻藏虾仁的保水效果显著,且因其价格低廉而被广泛应用。但磷酸盐超量添加问题时常出现,长期过量摄入会导致人体钙磷代谢失衡及其他相关疾病<sup>[2]</sup>。此外,多聚磷酸盐类,如三聚磷酸钠和焦磷酸钠在贮藏过程中易发生降解现象,会严重影响其对冻藏虾仁的抗冻保水效果<sup>[3]</sup>。

海藻糖是由 2 个葡萄糖分子通过半缩醛羟基缩合,通过 1,1-糖苷键连接而成的非还原性糖。海洋藻类等生物体,在处于高渗透压和低温环境中,海藻糖会在其组织细胞表面形成一种保护膜,使其在恶劣环境中仍然能保持正常的生物代谢活动。研究表明,海藻糖对多种生物体也具有好的保护作用<sup>[4,5]</sup>。糖类物质的生物活性在很大程度上受其分子结构的影响,糖类物质经过一定方式的修饰后,会增强或赋予其更多的生物活性,且毒副作用也会有所降低<sup>[6]</sup>。目前,对糖类进行修饰的常见方法有硫酸化、乙酰化、烷基化和磷酸化等<sup>[7]</sup>。磷酸化修饰是一种共价修饰,是糖分子支链上的羟基被磷酸根取代的修饰过程<sup>[8]</sup>。

本研究利用三聚磷酸钠和三偏磷酸钠混合试剂对海藻糖进行磷酸化修饰,优化磷酸化海藻糖的制备工艺条件,以期提高海藻糖的低温保护作用效果,同时减少冷冻虾类产品中磷酸盐的使用量,为冷冻水产品新型抗冻保护剂的开发提供理论和应用基础。

## 2 材料与方

### 2.1 材料与试剂

实验材料:鲜活南美白对虾,购于舟山市定海区临城街道老菜市场(体长 9~10 cm)。将活虾放置于装有冰块的保温箱,20~30 min 内运回实验室后,立即处理。

主要试剂:海藻糖、三聚磷酸钠、三偏磷酸钠、无水乙醇,以上试剂含量均大于 99%(青岛博智汇力生物科技有限公司)。

### 2.2 仪器与设备

SHA-B 双功能水浴恒温振荡器(金坛市岸头良友实验仪器厂);CF-16RN 高速冷冻多用途离心机(日本日立公司);DIRECT-Q 超纯水装置(美国 MILLIPORE 公司);751UVGD 型紫外-可见分光光度计(上海第三分析仪器);WTG-30 红外光谱仪(天津天光光学仪器仪器)。

### 2.3 实验方法

#### 2.3.1 磷酸化海藻糖的制备

将三聚磷酸钠和三偏磷酸钠按一定比例混匀后,溶于蒸馏水中,制备复合磷酸盐溶液;将一定量的海藻糖加入复合磷酸盐溶液中,充分溶解后,调节反应体系 pH 值。将混合体系置于恒温水浴振荡器中,恒温水浴震荡反应一定时间后,冷却至室温,加入 3 倍体积 95%乙醇过夜(4 °C),5000 r/min 离心 10 min,取沉淀再次溶于适量蒸馏水中,无水乙醇反复醇沉 2 次,离心获得沉淀经透析、冷冻干燥,获得制备的磷酸化海藻糖。

#### 2.3.2 单因素实验

磷酸化试剂配比:磷酸化反应时间 3 h,水浴温度 60 °C,海藻糖浓度 3%(W/V 为海藻糖质量与溶剂体积比),三聚磷酸钠和三偏磷酸钠(磷酸化试剂)配比分别为 1:1、2:1、4:1、6:1 和 8:1(三聚磷酸钠与三偏磷酸钠的质量比),经磷酸化反应后制备磷酸化海藻糖。以冻藏虾仁解冻损失率为评价指标,分析不同的磷酸化试剂比对磷酸化海藻糖抗冻活性的影响。

海藻糖浓度:磷酸化反应时间 3 h,反应温度 60 °C,磷酸化试剂配比 6:1,海藻糖浓度(w/v)分别为 2%、3%、4%、5%和 6%,经磷酸化反应后制备磷酸化海藻糖。以冻藏虾仁解冻损失率为评价指标,分析不同的海藻糖浓度对磷酸化海藻糖抗冻活性的影响。

反应时间:海藻糖浓度 3%,水浴温度 60 °C,磷酸化试剂配比 6:1,反应时间分别为 1.5、3、4.5、6、7 h,经磷酸化反应后制备磷酸化海藻糖。以冻藏虾仁解冻损失率为评价指标,分析不同的磷酸化反应时间对磷酸化海藻糖抗冻活性的影响。

反应温度:磷酸化反应时间 3 h,海藻糖浓度(W/V)3%,磷酸化试剂配比(三聚磷酸钠:三偏磷酸钠)6:1,反应温度分别为 50、60、70、80 和 90 °C,经磷酸化反应后制备磷酸化海藻糖。以冻藏虾仁解冻损失率为评价指标,分析不同的磷酸化反应温度对磷酸化海藻糖抗冻活性的影响。

#### 2.3.3 正交实验设计

在以上单因素试验基础上,选择磷酸化试剂配比(A)、海藻糖质量浓度(B)、反应时间(C)及反应温度(D)4 个因素,以冻藏虾仁解冻损失率(%)为评价指标,采用  $L_9(3^4)$  正交试

验设计, 优化磷酸化海藻糖的最佳制备工艺。正交实验因素水平表, 如表 1 所示。

表 1 因素水平表  
Table 1 Factor level table

水平	因素			
	A 磷酸化试剂 配比	B 海藻糖浓度 /%	C 反应时间 /h	D 反应温度 /°C
1	2:1	4	5	70
2	4:1	5	6	80
3	6:1	6	7	90

### 2.3.4 磷酸根含量的测定

参考钼蓝比色法。以磷酸根浓度为横坐标, 相应吸光度为纵坐标绘制标准曲线, 根据标准曲线计算样品中磷酸根含量。磷酸化海藻糖样品前处理方法, 参考孙雪等<sup>[6]</sup>方法。

### 2.3.5 磷酸化海藻糖红外光谱分析

将待测样品置于 80 °C 烘箱中干燥 3 h 后, 按照溴化钾质量的 1% 加入待测样品, 经充分研末混合、压片法后, 进行红外光谱测试。

### 2.3.6 浸泡增重率和解冻损失率的测定

新鲜南美白对虾经去头、去壳后, 获得完整虾仁, 进行称重(记为  $M_1/g$ )。将虾仁完全浸没于处理溶液中, 4 °C 冰箱中保持 3 h, 每隔 30 min 用玻璃棒缓慢搅拌 1 次。浸泡结束后取出虾仁, 纱布拭去虾仁表面水分, 进行称重 ( $M_2/g$ )。然后, 将虾仁封口袋包装后置于 -18 °C 冰箱中, 贮藏 14 d 后取出, 4 °C 冰箱中解冻 3 h 后, 纱布拭去虾仁表面水分, 进行称重 ( $M_3/g$ )。浸泡增重率 (%) =  $(M_2 - M_1) / M_1 \times 100\%$ 。解冻损失率 (%) =  $(M_2 - M_3) / M_2 \times 100\%$ 。

### 2.3.7 磷酸化海藻糖对冻藏虾仁抗冻活性的验证

实验分组: 蒸馏水(对照)、三聚磷酸钠、三偏磷酸钠和磷酸化海藻糖处理组。以上溶质质量浓度均为 3.0 g/100 mL。将新鲜虾仁分别浸没于以上 4 种溶液中, 浸没处理后虾仁于 -18 °C 条件下冻藏 45 d 后, 测定各组虾仁浸泡增重率和解冻损失率, 验证分析磷酸化海藻糖对冻藏虾仁的抗冻作用效果。

### 2.3.8 数据分析与作图

数据处理及作图采用 Origin 8.0、Excel 2007 和 SPSS 17.0 进行作图及统计分析, 结果表示为平均值  $\pm$  SD。

## 3 结果与分析

### 3.1 磷酸化海藻糖制备的单因素实验

#### 3.1.1 磷酸化试剂对比对磷酸化海藻糖抗冻活性的影响

如图 1 所示, 在 2 种磷酸盐总量不变情况下, 随着磷酸化试剂配比(三聚磷酸钠:三偏磷酸钠)的增加, 处理后虾

仁肌肉的解冻损失率逐渐下降, 表明磷酸化试剂中三聚磷酸钠占比较大时, 更有助于降低冷冻虾仁的解冻损失率, 其原因可能是三聚磷酸钠中磷酸基团更易于嫁接在海藻糖分子上。有研究表明, 磷酸化修饰采用三聚磷酸钠和三偏磷酸钠混合物的修饰效果, 优于单独使用这 2 种单一的试剂, 2 种磷酸盐的相互作用可能在磷酸根共价修饰过程中起到相互促进的作用<sup>[9]</sup>。当三聚磷酸钠:三偏磷酸钠配比高于 4:1 时, 处理虾仁的解冻损失率又逐渐升高, 可能是由于, 2 种磷酸化试剂的配比较大影响了磷酸根的修饰效果, 减少了海藻糖分子上共价结合的磷酸根离子数量, 因而影响了虾仁的解冻损失率。

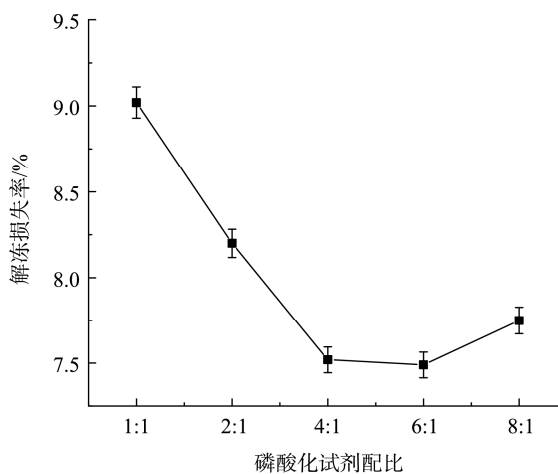


图 1 磷酸化试剂对比对虾仁解冻损失率的影响 ( $n=3$ )

Fig. 1 Effect of the ratio of phosphorylated reagents on thawing loss of frozen shrimp ( $n=3$ )

#### 3.1.2 海藻糖浓度对磷酸化海藻糖抗冻活性的影响

如图 2 所示, 当海藻糖浓度在 2%~5% 范围时, 随着海藻糖浓度的增加, 虾仁解冻损失率逐渐降低; 当海藻糖浓度为 5%~6% 时, 虾仁解冻损失率并未表现出显著性的变化。研究表明, 海藻糖能有效降低冷冻虾仁的汁液损失, 对虾仁肌肉肌原纤维蛋白稳定、组织微观结构等起到较好的低温保护作用<sup>[10]</sup>。本实验中, 海藻糖经磷酸根离子修饰后, 仍可表现出优良的虾仁解冻损失率调控作用, 其很可能是由海藻糖与磷酸根离子协同作用的效果。而当海藻糖浓度增大到一定程度后, 虾仁肌肉解冻损失率改善效果已达到较好状态, 而无法继续表现出降低现象。

#### 3.1.3 反应时间对磷酸化海藻糖抗冻活性的影响

如图 3 所示, 当磷酸化反应时间小于 6 h 时, 随着磷酸化反应时间的增加, 虾仁解冻损失率逐渐降低; 当磷酸化反应时间达到 6 h 时, 虾仁解冻损失率最低达 3.45%; 而后磷酸化时间继续增加, 虾仁解冻损失率又出现明显升高的趋势。这可能是由于在 6 h 范围内, 随着反应时间的延长, 磷酸化反应得以充分进行, 磷酸根离子与海藻糖羟基间的结合效果较好, 因而在海藻糖和磷酸根离子的协同作

用下冷冻虾仁解冻损失率逐渐降低。反应时间继续增加时,海藻糖与磷酸根离子在较高温度条件下长时间反应,可能造成了磷酸化海藻糖分子结构的破坏,发生部分降解现象(磷酸化效果降低),因而处理后冷冻虾仁解冻损失率有所增大。

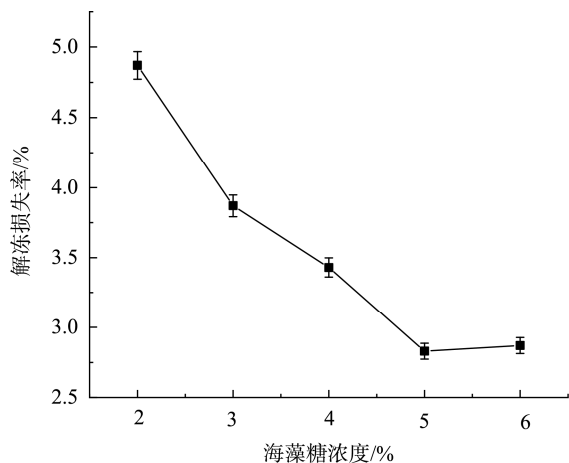


图 2 海藻糖浓度对虾仁解冻损失率的影响(n=3)

Fig.2 Effect of trehalose concentration on thawing loss of frozen shrimp (n=3)

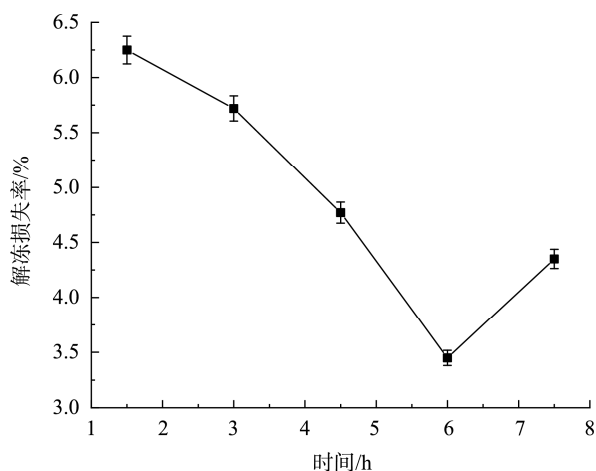


图 3 海藻糖磷酸化时间对虾仁解冻损失率的影响(n=3)

Fig.3 Effect of the phosphorylation time on thawing loss of frozen shrimp (n=3)

3.1.4 反应温度对磷酸化海藻糖抗冻活性的影响

如图 4 所示,当磷酸化反应温度在 50~80 °C 范围内,随着反应温度的升高,处理虾仁解冻损失率逐渐降低;当磷酸化反应温度达 80 °C 时,虾仁解冻损失率最低达 2.96%,原因可能是在一定反应温度范围内,反应温度升高,磷酸盐和海藻糖分子动能增加,磷酸化反应体系能量升高,分子键活性增强,致使磷酸化试剂的利用率也随之增加<sup>[6]</sup>,有利于磷酸根基团接近羟基进行磷酸化反应<sup>[11]</sup>。但当反应温度继续升高时,虾仁的解冻损失率再次出现升高的趋势,可能是由于反应温度过高时,海藻糖分子运动剧烈,导致部分海藻糖分子发生降解<sup>[12]</sup>,即磷酸化反应产物生成率降

低,故在该实验条件下制备的磷酸化海藻糖有效成分降低,经其处理的冷冻虾仁解冻损失率出现增高趋势。

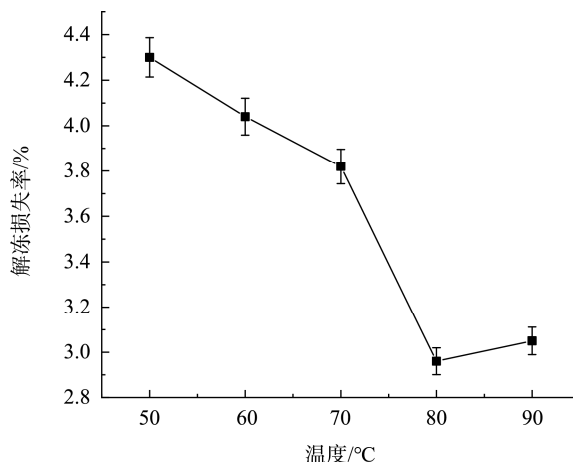


图 4 磷酸化温度对虾仁解冻损失率的影响(n=3)

Fig.4 Effect of the phosphorylated temperature of on thawing loss of frozen shrimp (n=3)

3.2 磷酸化海藻糖制备的正交优化试验

在以上单因素试验基础上,以浸泡处理后的虾仁解冻损失率为指标,对海藻糖磷酸化制备反应条件:磷酸化试剂配比、海藻糖浓度、反应温度和反应时间进行四因素三水平的正交试验。正交试验和极差分析结果,如表 2 所示。结果发现,4 个因素对处理虾仁解冻损失率影响大小顺序依次为:磷酸化试剂配比=温度=时间 > 海藻糖浓度,各因素理论最优水平组合为 A<sub>3</sub>B<sub>3</sub>C<sub>3</sub>D<sub>3</sub>,因此磷酸化海藻糖制备的最优工艺参数为:磷酸化试剂配比(三聚磷酸钠:三偏磷酸钠)6:1,海藻糖浓度 6%,温度 90 °C 和时间 7 h。

表 2 正交试验结果

Table 2 Results of orthogonal test

试验号	A	B	C	D	解冻损失率/%
1	1	1	1	1	0.0378
2	1	2	2	2	0.0425
3	1	3	3	3	0.0269
4	2	1	2	3	0.0313
5	2	2	3	1	0.0309
6	2	3	1	2	0.0358
7	3	1	3	2	0.0274
8	3	2	1	3	0.0272
9	3	3	2	1	0.0315
K <sub>1</sub>	0.036	0.032	0.034	0.033	
K <sub>2</sub>	0.033	0.034	0.035	0.035	
K <sub>3</sub>	0.029	0.031	0.028	0.028	
R	0.07	0.03	0.07	0.07	
最佳条件	A <sub>3</sub>	B <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	D <sub>3</sub>	

### 3.3 磷酸化海藻糖对冻藏虾仁的保水效果验证

根据以上优化组合制备磷酸化海藻糖,进行验证性实验,结果如表 3 所示。相比于蒸馏水处理组,三聚磷酸钠、三偏磷酸钠和磷酸化海藻糖均可以显著性降低冷冻虾仁的解冻损失率( $P<0.05$ ),且该 3 组间并无显著性差异。其中磷酸化海藻糖的解冻损失率为 4.31%,表明该优化工艺条件下制备的磷酸化海藻糖,对冻藏虾仁具有较好的抗冻保水作用。

表 3 正文试验验证结果  
Table 3 Orthogonal test verification results

组别	解冻损失率/%	浸泡增重率/%
蒸馏水	8.34±1.78 <sup>A</sup>	9.69±1.98 <sup>A</sup>
三聚磷酸钠	5.36±1.51 <sup>B</sup>	8.50±1.40 <sup>B</sup>
三偏磷酸钠	4.95±1.38 <sup>B</sup>	7.67±1.92 <sup>B</sup>
磷酸化海藻糖	4.31±1.12 <sup>B</sup>	8.43±1.82 <sup>B</sup>

注:表格中每列不同大写字母,表示显著性差异( $P<0.05$ )。

### 3.4 磷酸化海藻糖的红外光谱分析

整体来看,经磷酸化修饰后的海藻糖,在红外吸收波形、吸收峰强度、峰宽等特征方面与未修饰的海藻糖相比并未发生较大变化,如图 5,说明经磷酸化修饰后的海藻糖分子主体结构并没有发生显著变化<sup>[13]</sup>。在 3390.47  $\text{cm}^{-1}$  和 3336.13  $\text{cm}^{-1}$  处的吸收峰,为磷酸化海藻糖和海藻糖 -OH 的伸缩振动吸收峰,表明磷酸化海藻糖和海藻糖中均含有较多的分子内氢键<sup>[14]</sup>。在磷酸化海藻糖吸收光谱中,1050~950  $\text{cm}^{-1}$  处 C-O-P 伸缩振动峰以及 1350~1160  $\text{cm}^{-1}$  附近 -O-PO<sub>3</sub> 的 P=O 伸缩振动峰,为磷酸根离子的典型特征吸收峰;此外,还有 1213  $\text{cm}^{-1}$  处的 P=O 键伸缩振动吸收峰和 967  $\text{cm}^{-1}$  处的 P-O-C 键吸收峰<sup>[15]</sup>,也可表明磷酸基团在海藻糖分子上的有效结合。由海藻糖和磷酸化海藻糖的红外光谱可知,经磷酸化修饰后,磷酸根离子已于海藻糖分子发生共价结合,形成了磷酸基团-海藻糖分子共价复合物。进一步,依据建立的磷酸根含量测定标准曲线,测得制备的磷酸化海藻糖中磷酸根含量为 11.68%。

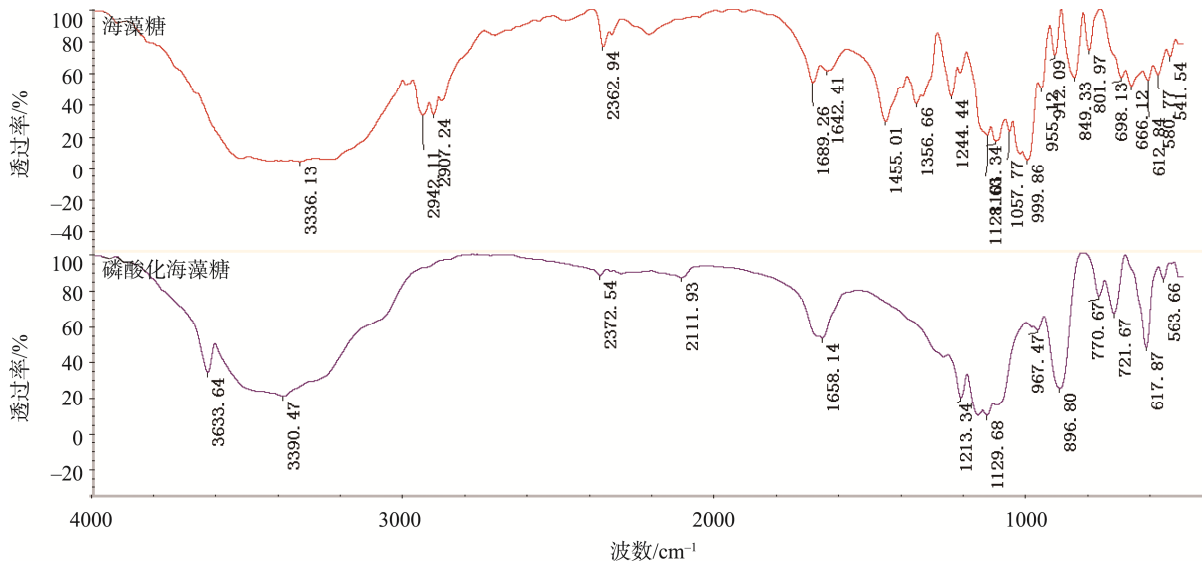


图 5 海藻糖和磷酸化海藻糖的红外光谱图。

Fig.5 The infrared ray spectrums of trehalose and phosphorylated trehalose

## 4 结论

通过单因素及正交实验优化,获得磷酸化海藻糖制备的最佳工艺参数为:磷酸盐(三聚磷酸钠和三偏磷酸钠)配比 6:1,海藻糖浓度 6%,温度 90  $^{\circ}\text{C}$  和反应时间 7 h。在该实验条件下,磷酸化海藻糖浸泡处理可显著降低冷冻虾仁的浸泡损失率,低温保护效果与常见磷酸盐并无显著性差异。经磷酸化修饰后,海藻糖分子主体结构并未发生显著变化,其磷酸根含量为 11.68%。本研究制备的海藻糖磷

酸化衍生物,可为冷冻水产品新型的低磷保水剂开发提供理论基础与研究方向。

### 参考文献

- [1] 蓝蔚青, 胡潇予, 阮东娜, 等. 流化冰处理对南美白对虾冰藏期间品质与水分迁移变化的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(9): 248-255.
- Lan WQ, Hu XY, Ruan DN, et al. Effect of fluidization ice treatment on quality and water migration of *Penaeus vannamei* during ice storage [J]. Food Sci, 2019, 40(9): 248.
- [2] 张迎阳. 肉与肉制品中磷酸盐残留的调查与控制研究[D]. 南京: 南京

- 农业大学, 2006.
- Zhang YY. Investigation and control of phosphate residue in meat and meat products [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006.
- [3] 邵颖, 姚洁玉, 江杨阳, 等. 抗冻剂对鱼肉蛋白质冷冻变性的保护作用[J]. 食品科学, 2018, 39(7): 291–297.
- Shao Y, Yao JY, Jiang YY, *et al.* Protective effect of antifreeze on frozen denaturation of fish protein [J]. *Food Sci*, 2018, 39 (7): 291–297.
- [4] 张雪莹, 申铨日, 朱念, 等. 罗非鱼片无磷保水剂的工艺配方优化[J]. 食品科技, 2015, (6): 163–168.
- Zhang XY, Shen HR, Zhu N, *et al.* Optimization of process formula of phosphorus-free water retaining agent for tilapia fillet [J]. *Food Sci Technol*, 2015, (6): 163–168.
- [5] Li H, Wang HL, Du J, *et al.* Trehalose protects wine yeast against oxidation under thermal stress [J]. *World J Microbiol Biotechnol*, 2010, 26(6): 969–976.
- [6] 孙雪, 潘道东, 曾小群, 等. 浒苔多糖的磷酸化修饰工艺[J]. 食品科学, 2011, 32(24): 73–77.
- Sun X, Pan DD, Zeng XQ, *et al.* Phosphorylation modification of *Enteromorpha* polysaccharide [J]. *Food Sci*, 2011, 32 (24): 73–77.
- [7] 张占军, 张艳艳. 多糖分子修饰研究进展[J]. 食品工业, 2017, 38(5): 253–257.
- Zhang ZJ, Zhang YY. Progress in molecular modification of polysaccharides [J]. *Food Ind*, 2017, 38(5): 253–257
- [8] Blennow A, Nielsen TH, Baunsgaard L, *et al.* Starch phosphorylation: a new front line in starch research [J]. *Trends Plant Sci*, 2002, 7(10): 445–450.
- [9] 张难, 邱树毅, 吴远根, 等. 磷酸化香菇多糖的制备及其部分理化性质的研究[J]. 食品研究与开发, 2008, (8): 21–25.
- Zhang N, Qiu SYi, Wu YG, *et al.* Preparation and some physicochemical properties of phosphorylated *Lentinus edodes* polysaccharide [J]. *Food Res Dev*, 2008, (8): 21–25.
- [10] 马璐凯, 张宾, 王强, 等. 海藻糖、海藻胶及寡糖对南美白对虾蛋白质冷冻变性的抑制作用[J]. 现代食品科技, 2014, 30(6): 140–145.
- Ma YK, Zhang B, Wang Q, *et al.* The inhibitory effect of trehalose, alginate and oligosaccharide on the freezing and degeneration of the protein of *Penaeus vannamei* [J]. *Mod Food Technol*, 2014, 30(6): 140–145.
- [11] 林丽菁. 木薯淀粉磷酸酯的结构表征及理化性质研究[D]. 南宁: 广西大学, 2005.
- Lin LJ. Study on structure characterization and physicochemical properties of cassava starch phosphate [D]. Nanning: Guangxi University, 2005.
- [12] 郑常领, 赵柄舒, 王玉华, 等. 黑木耳多糖的磷酸化修饰及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2019, 40(17): 134–141, 147
- Zheng CL, Zhao BS, Wang YH, *et al.* Study on the phosphorylation of *Auricularia auricula* polysaccharide and its antioxidant activity [J]. *Food Ind Technol*, 2019, 40(17): 134–141, 147.
- [13] Sun J, Zhou B, Tang C, *et al.* Characterization, antioxidant activity and hepatoprotective effect of purple sweetpotato polysaccharides [J]. *Int J Biol Macromol*, 2018, 33(4): 69–76.
- [14] Wang J, Wang Y, Xu L, *et al.* Synthesis and structural features of phosphorylated *Artemisia sphaerocephala* polysaccharide [J]. *Carbohydr Polym*, 2018, 10(49): 19–26.

(责任编辑: 王 欣)

## 作者简介

张小利, 硕士研究生, 主要研究方向为水产品加工与贮藏。  
E-mail: zxli776@163.com

张 宾, 教授, 主要研究方向为水产品加工与贮藏。  
E-mail: zhangbin\_ouc@163.com