

抗冻剂对冷冻鱼糜蛋白理化和凝胶特性的影响综述

杨 振, 孔保华*

(东北农业大学食品学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘 要: 冷冻储藏是一种广泛用于保存鱼糜制品的方法。但是在储藏的过程中会使蛋白质发生冷冻变性, 使鱼糜蛋白的空间构象发生变化, 导致蛋白理化性质及凝胶特性发生变化, 包括盐溶性蛋白含量、 Ca^{2+} -ATPase 活性以及巯基含量的降低, 二硫键含量和表面疏水性增加, 凝胶破断力、变形程度以及持水力减小等。加入抗冻剂可在一定程度上抑制蛋白冷冻变性。本文概述了冷冻鱼糜蛋白变性机理, 并总结了几种抗冻剂对冷冻鱼糜蛋白理化性质及凝胶特性的影响。

关键词: 鱼糜蛋白; 冷冻变性; 抗冻剂; 理化特性; 凝胶特性

A Review of the Literature on the Effect of Cryoprotectants on Physico-chemical Properties and Gel Properties of Frozen Surimi

YANG Zhen, KONG Bao-hua*

(College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Frozen storage is a widely used method for the preservation of surimi products. However, protein denaturation may occur during frozen storage. Protein conformation change can result in changes in its physico-chemical and gel properties such as a reduction of salt-soluble protein content, Ca^{2+} -ATPase activity, sulfhydryl group content, breaking force, deformation capability and water-holding capacity as well as an increase of hydrophobicity and disulfide bond content of surimi gels. The addition of cryoprotectants can mitigate protein frozen denaturation. Here, we review recent research progress in the mechanisms of protein denaturation during frozen storage and the effects of several cryoprotectants on physico-chemical and gel properties of frozen surimi.

Key words: surimi protein; frozen denaturation; cryoprotectant; physico-chemical properties; gel properties

中图分类号: TS201.3

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2011)23-0321-05

鱼糜制品具有高蛋白, 低脂肪, 食用方便和易于储藏等特点, 而且冷冻鱼糜是加工多种鱼糜制品的中间原料。肌原纤维蛋白是鱼糜的主要功能性成分。低温冷冻储藏是一种广泛应用的长期保存鱼糜产品的方法。然而, 在冷冻储藏期间, 由于肌原纤维蛋白的变性或聚集, 可能影响鱼糜的功能特性, 如蛋白质溶解性减小以及凝胶形成能力和持水力变差等。为了抑制或减缓冷冻储存期间蛋白的变性或聚集, 通常在鱼糜加工过程中加入抗冻剂。在鱼糜产业中, 蔗糖-山梨醇混合物是常用抗冻剂。虽然商业化上这种混合物有明显的抗冻作

用, 可以抑制蛋白质变性, 但是它也能够导致鱼糜产品过甜和能量值过高。而且, 它能够影响鱼糜产品的味道, 限制它的消费人群(如糖尿病人和肥胖症人群)。因此, 研究其他抗冻剂如低聚糖类、蛋白水解物、酶解物、多元醇和盐类等对冷冻鱼糜的抗冻作用已成为近年来的热点。本文主要论述了鱼糜蛋白变性机理, 及加入抗冻剂对鱼糜蛋白理化特性和凝胶特性的影响。

1 鱼糜蛋白理化和凝胶特性在冷冻储藏期间的变化

鱼肉蛋白在冻藏过程中易发生变性而使其溶解性下

收稿日期: 2010-12-20

基金项目: 东北农业大学创新团队项目(CXZ011)

作者简介: 杨振(1986—), 女, 硕士研究生, 研究方向为畜产品加工。E-mail: yangzhen960@163.com

* 通信作者: 孔保华(1963—), 女, 教授, 博士, 研究方向为畜产品加工。E-mail: kongbh@163.com

降,在冻藏期间发生变化的主要是肌原纤维蛋白,而且主要为其中的肌球蛋白,肌动蛋白变化很小。由于鱼糜肌原纤维蛋白发生变性或聚集,使得蛋白质溶解性、 Ca^{2+} -ATPase 活性和巯基含量减小,鱼糜凝胶破断力、变形程度和持水力变差,而二硫键含量和表面疏水性增加。

2 鱼糜蛋白变性机理

鱼糜蛋白变性,是指鱼糜在 $-12\sim-23^{\circ}\text{C}$ 冷冻储藏条件下,蛋白质受物理或化学因素的影响,其内部分子原有的高度规律性的空间结构发生变化,从而导致蛋白质的理化性质和生物学性质发生变化,但蛋白质的一级结构并没有被破坏^[1]。对于鱼糜来说,低温储藏过程中蛋白冷冻变性现象是一个普遍存在的问题。在储藏过程中造成蛋白变性的原因主要有以下几个方面^[2]: 1) 冷冻时鱼肉组织中结合水在 -18°C 部分冻结,导致蛋白质分子中的侧链和侧链之间互相结合,形成二硫键、氢键、疏水键等,使蛋白质凝聚而产生不可逆变性。2) 冻结时由于冰晶体生成导致结合水和蛋白质分子的结合状态破坏,加之冰晶体互相挤压,使维系依赖蛋白质结构稳定的部分化学键破坏,部分化学键重新组建。另一方面由于冰晶相互作用使结合水与蛋白质分子又重新组合成稳定结构。这些化学键的断裂重建涉及到蛋白质分子高级结构的变化而导致蛋白质变性。3) 冻结引起的冰晶析出会导致肌肉细胞液的浓缩,使其中的盐浓度升高和 pH 值改变,由此引发鱼肉蛋白的变性。

3 抗冻剂对鱼糜蛋白理化及凝胶特性的影响

鱼糜在冷冻储藏中易发生变性,虽然通过冻藏、解冻条件等的控制可缓解蛋白变性程度和速度,但是对鱼本身蛋白的可控性是有限的,因此,鱼糜中添加抗冻剂是目前最有效的防止蛋白冷冻变性的方法。鱼糜中加入抗冻剂后,通过缓解分子间的次级键与二硫键间的聚集,极大的减小溶解性的损失,抑制蛋白 Ca^{2+} -ATPase 活性的降低、表面疏水基团和巯基的迅速暴露、凝胶强度降低以及持水性减小。

3.1 抗冻剂对鱼糜蛋白理化特性的影响

3.1.1 抗冻剂对盐溶性蛋白含量的影响

肌原纤维蛋白是盐溶性蛋白,在冷冻储存期间由于氢键或疏水键的形成,以及二硫键和离子间相互作用引起蛋白质变性,从而导致其盐溶性下降。因此测定盐溶性蛋白含量在一定程度上可以反映蛋白变性程度。Xiong 等^[3]研究发现,草鱼鱼糜中不加和分别加入 1% 魔芋葡甘聚糖(KGM)、10% 蔗糖-山梨醇在 -18°C 冷冻储藏 5d 后,盐溶性蛋白含量分别是 60.1%、84.1% 和

85.6%,在储藏 30d 后盐溶性蛋白含量分别是 40.1%、75.2% 和 70.2%,表明抗冻剂的添加对草鱼蛋白变性有很好的抑制作用。

鳕鱼鱼糜中分别加入 8% 蔗糖-山梨醇-利体素-拉克替醇(质量比为 1:1:1:1)、8% 蔗糖-山梨醇(质量比为 1:1)以及对照组在 -18°C 冷冻储藏 4 个月后,盐溶性蛋白含量分别从 79%、78% 和 60% 减小到 48%、49% 和 19%,这也表明加入抗冻剂对蛋白变性有抑制作用^[4]。Lian 等^[5]研究发现,不加和同时加入 0.4% 藻酸盐、4% 山梨醇和 0.3% 三聚磷酸钠(STPP)的红狗鳕鱼糜 -20°C 储存 17 周后,盐溶性蛋白含量分别减少 37% 和 9.9%,这表明同时加入藻酸盐、山梨醇、三聚磷酸钠(STPP)可有效阻碍蛋白冷冻变性。Park 等^[6]报道,分别添加聚葡萄糖和蔗糖-山梨醇的狭鳕鱼糜在 -28°C 贮存 8 个月后,盐溶性蛋白含量下降程度相似,分别为 20% 和 18%,表明聚葡萄糖能够代替蔗糖-山梨醇成为等效抗冻剂。研究发现,不加和分别加入等量海藻糖、乳酸钠和蔗糖-山梨醇的罗非鱼糜在 -18°C 储存 24 周后,盐溶性蛋白含量与初始值比较,分别减少 44.8%、24.4%、29.6% 和 24.7%,这表明加入抗冻剂对蛋白冷冻变性有抑制作用^[7]。谢超等^[8]研究发现,海鳗鱼糜中加入 10% 低聚糖(果糖)冷冻 7d 和 14d 后,对照组和加低聚糖样本的盐溶性蛋白含量分别为 35.5、47.8mg/g 和 29.1、42.1mg/g。这说明加入低聚糖(果糖)对抑制鱼糜冷冻变性有较明显的效果。

3.1.2 抗冻剂对 Ca^{2+} -ATPase 活性的影响

鱼肉肌原纤维蛋白具有 ATPase 活性,发生变性的蛋白主要为肌原纤维蛋白中的肌球蛋白, Ca^{2+} -ATPase 活性是反应肌球蛋白分子完整性的主要指标。肌球蛋白球状头部与 Ca^{2+} -ATPase 活性有关。冻藏过程中 Ca^{2+} -ATPase 活性的降低可能与肌球蛋白球状头部的构象变化以及聚集有关。肌球蛋白头部构象变化是由冰晶和体系的离子强度增加引起的^[9]。因此, Ca^{2+} -ATPase 活性降低是冷冻储藏期间蛋白质变性的主要指标。研究表明,罗非鱼糜 -18°C 储藏 24 周期间,分别加入 8% 海藻糖和 8% 蔗糖-山梨醇及对照组样品的 Ca^{2+} -ATPase 活性的变化,在储藏 9 周后,对照组的 Ca^{2+} -ATPase 活性丧失,而加入抗冻剂的鱼糜蛋白 Ca^{2+} -ATPase 活性没有显著变化,表明加入抗冻剂可显著阻碍 Ca^{2+} -ATPase 活性的降低,抑制蛋白冷冻变性^[8]。MacDonald 等^[10]证明了海藻酸钠是一种有效的抗冻剂,分别加入 6% 海藻酸钠和 25% 蔗糖对罗非鱼糜肌动球蛋白的 Ca^{2+} -ATPase 活性发挥相似的作用。研究发现,虹鳟鱼糜在冷冻储藏 24h 过程中,分别加入 8% 蔗糖-山梨醇(质量比为 1:1)、8% 拉克替醇、8% 聚葡萄糖和 8% 葡萄糖浆可有效的防止蛋白 Ca^{2+} -ATPase 活性剧烈降低,并且与加蔗糖-山梨醇鱼糜

相比, 加聚葡萄糖和葡萄糖浆的鱼糜蛋白 Ca^{2+} -ATPase 活性下降趋势减弱^[11]。

在-25℃储藏6个月期间, 虾中提取的壳聚糖对狗母鱼鱼糜的抗冻作用, 结果表明, 对照样及加入蔗糖、明虾、黑虎虾和巨型淡水虾提取的壳聚糖的鱼糜在储藏6个月后, Ca^{2+} -ATPase 活性分别减小到原来的12.1%、71.7%、11.5%、12.8%和12.3%。这说明加入虾提取的壳聚糖对冷冻诱导的蛋白变性没有明显抑制作用, 但是蔗糖对蛋白冷冻变性有抑制作用^[12]。Xiong等^[3]报道在-18℃冷冻储藏30d, 魔芋葡甘聚糖(KGM)对草鱼鱼糜蛋白 Ca^{2+} -ATPase 活性影响, 结果表明, 储藏30d后, 与初始值($0.34 \mu\text{mol}(\text{pi})/\text{mg} \cdot \text{min}$)比较, 加入1% KGM和10%蔗糖-山梨醇的样品, 其 Ca^{2+} -ATPase 活性值分别减小37.1%和34.3%, 而对照组减小71.4%。这表明使用抗冻剂可缓解 Ca^{2+} -ATPase 活性的降低, 并且对草鱼肌原纤维蛋白有较好的抗冻作用, 但是两种抗冻剂间并没有显著差异, 即KGM可以替代蔗糖作为抗冻剂使用。

3.1.3 抗冻剂对巯基含量的影响

巯基是蛋白质分子中最具反应活性的基团^[13]。鱼糜肌球蛋白分子中含有活性巯基, 这些巯基在冷冻储藏过程中氧化和聚集变性都会导致其含量减少。在冷冻储藏期间, 肌球蛋白分子结构的变化可能导致其活性巯基暴露, 使其氧化形成二硫键^[14]。冷冻储藏使蛋白构型发生变化而变性, 进而暴露活性巯基基团, 形成二硫键。但是加入抗冻剂后可较好的阻碍蛋白构型发生变化, 抑制巯基暴露, 从而抑制二硫键形成。

鲮鱼鱼糜中分别加入8%海藻糖、聚葡萄糖和乳酸钠在-18℃储存26周后, 与对照组比较, 3种物质的加入均能较好地抑制冻藏鲮鱼鱼糜蛋白的冷冻变性, 且乳酸钠具有比传统商业抗冻剂更好的抗冻效果, 更好地抑制鲮鱼鱼糜巯基含量的下降^[15]。Lian等^[5]发现, 向红狗鱼鱼糜中同时加入0.4%藻酸盐、4%山梨醇和0.3%三聚磷酸钠(STPP)作为抗冻剂, 在-20℃储藏17周后, 与对照组的巯基含量分别减少约15%和35%, 表明加入抗冻剂后可显著抑制巯基含量的减少。巯基含量的减少可能有两种原因: Huidobro等^[16]认为中间和内部蛋白质的巯基形成交联键导致巯基含量减少; Owusu-Ansah等^[17]认为蛋白质中暴露的巯基与添加物或小分子化合物(如肽等)相互作用导致巯基含量减少。刘欣等^[18]对鳙鱼鱼糜中分别添加海藻糖和乳酸钠作为抗冻剂, 在-18℃冻藏时蛋白的变化发现, 储存24周后, 对照样及分别添加8%海藻糖、8%乳酸钠和8%蔗糖-山梨醇样品的巯基含量分别减少69.8%、26.0%、27.5%和32.5%, 以对照样变化最为显著, 其次为商业抗冻剂, 而加入海藻糖与乳酸钠样品的巯基含量下降程度相似。加入不同酶水解的红鱼鱼排酶解物的鳙鱼鱼糜-30℃冻藏12周过

程中, 对照样的巯基含量下降速度最快, 加入酶解物后蛋白巯基含量下降速度减小。不同红鱼鱼排酶解物具有不同的抑制肌球蛋白巯基含量减少的能力, 木瓜蛋白酶(PPH)鱼排水解物具有最好的抑制巯基含量减少的效果, 其次是碱性蛋白酶(APH), 然后是风味蛋白酶(FPH)^[19]。

3.1.4 抗冻剂对表面疏水性的影响

新鲜鱼糜蛋白的疏水性氨基酸残基一般位于蛋白质分子内部, 具有较低的表面疏水性, 而在冷冻储藏的过程中, 蛋白质可因变性而发生构型转化, 使原先位于蛋白质分子内部的疏水性氨基酸残基暴露, 导致蛋白质表面疏水性增加^[20]。加入抗冻剂(8%海藻糖、8%乳酸钠和8%蔗糖-山梨醇)后, -18℃冷冻储藏的鳙鱼鱼糜蛋白其表面疏水性的增加得到明显的抑制, 表明加入抗冻剂可在很大程度上稳定鳙鱼鱼糜蛋白的结构, 并且海藻糖和乳酸钠的抗冻效果与蔗糖-山梨醇相近^[18]。研究表明, 罗非鱼糜在-18℃储存24周后, 与新鲜鱼糜蛋白表面疏水性相比, 加入海藻糖、乳酸钠、蔗糖-山梨醇的样品及对照样品的表面疏水性分别增加了110.1%、113.1%、133.5%和200.7%, 这表明添加不同抗冻剂对稳定蛋白质结构有不同的作用, 并且可以阻止蛋白质疏水基团更大程度的暴露, 但是在整个冻藏过程中, 加蔗糖-山梨醇的样品其表面疏水性要高于加海藻糖和乳酸钠的样品^[7]。

Herrera等^[11]研究发现, 鱼糜中加入聚葡萄糖、拉克替醇、葡萄糖浆和蔗糖-山梨醇减少了肌动球蛋白表面疏水性残基的暴露以及通过内部分子间疏水作用发生的聚集。薛勇等^[19]报道, 鳙鱼鱼糜中加入红鱼鱼排酶解物后冻藏可抑制蛋白表面疏水性的增加, 在-30℃冻藏12周后, 加入木瓜蛋白酶(PPH)、碱性蛋白酶(APH)和风味蛋白酶(FPH)酶解物的样本其蛋白表面疏水性分别增加到初始值的138.5%、159.8%和168.1%, PPH、APH酶解物与FPH酶解物相比, 更好的抑制了冻藏过程中蛋白表面疏水性的增加, 但是前两者间无显著差异。

3.2 抗冻剂对鱼糜凝胶特性的影响

3.2.1 抗冻剂对鱼糜凝胶质构特性的影响

凝胶质构特性主要包括凝胶的破断力和变形程度, 并取决于肌球蛋白或肌动球蛋白的性质。在冻藏过程中, 肌球蛋白分子构象发生变化, 蛋白质分子间相互作用形成氢键和二硫键等其他共价键或非共价键, 导致了凝胶强度的下降。

谢超等^[8]研究表明, 随着低聚糖(果糖)质量浓度(0、2、4、6、8、10g/100mL)增加, 海鳗鱼糜凝胶强度是逐渐增大的, 最大值出现在质量浓度为10g/100mL时, 约为对照样的1.4倍。Ruttanapornvareesakul等^[21]研究虾头部蛋白水解物(SHPH)及谷氨酸钠对狗母鱼糜在

—25℃冷冻储藏180d的抗冻影响时发现,对照组、分别加入4种虾头部蛋白水解物组和谷氨酸钠组的凝胶强度分别减小到初始值的45.77%、91.79%、85.83%、89.80%和95.53%,表明加入SHPH或谷氨酸钠可显著抑制蛋白变性并保持鱼糜凝胶功能特性。Auh等^[22]也发现在-18℃冻藏下,高支链寡糖能够较好地保持阿拉斯加鳕鱼肌动球蛋白的凝胶特性。刘艺杰等^[23]研究鳕鱼鱼排酶解物对鳕鱼鱼糜冻藏过程中蛋白质变性的影响时发现,将冻藏60d后的鱼糜样品制成鱼肉肠测定其凝胶强度,对照组、分别加入木瓜酶酶解物组、低温碱性酶酶解物组、风味酶酶解物组和蔗糖组,凝胶强度分别为新鲜鱼糜肉肠凝胶强度的47.6%、79.7%、67.4%、66.8%和85.5%。由此可见,加入酶解物可缓解凝胶强度减小,3种酶解物作用区别较大,木瓜酶酶解物的抗冻作用好于其他两种酶解物,与商业抗冻剂相当。刘慧等^[24]在鱼糜加工过程中,加入TG酶、结冷胶和大豆分离蛋白作为抗冻剂,研究抗冻剂对反复冻融鱼糜的凝胶特性的影响,结果表明,加抗冻剂的鱼糜比未加抗冻剂的鱼糜凝胶质构特性好,抗冻剂的添加对鱼糜反复冻融后的凝胶质构有明显效果。汪之和等^[25]研究抗冻剂对几种西非鱼鱼糜凝胶特性的影响时发现,抗冻剂能明显提高鱼糜制品的凝胶强度。

3.2.2 抗冻剂对鱼糜凝胶持水力的影响

持水力(WHC)是鱼糜凝胶特性的物理参数,较大的WHC值表示鱼糜凝胶有较好的保持水分的能力。

鳕鱼鱼糜加入两种比例的8%混合抗冻剂(蔗糖、山梨醇、利体素、拉克替醇质量比为1:1:3:3和1:1:1:1)在-18℃冷冻储藏16周后,其持水力分别减小约37%和30%,而对对照样的持水力减小约50%,研究表明加入一定比例的蔗糖、山梨醇、利体素和拉克替醇混合抗冻剂可显著提高凝胶持水力,并在一定程度上抑制蛋白变性,从而抑制凝胶持水力的减小^[4]。Xiong等^[3]研究发现,随着魔芋葡甘聚糖(KGM)加入量(0~2%)增加,鱼糜凝胶持水力显著增大,表明较高加入量KGM可显著增强鱼糜凝胶的持水力,KGM作为抗冻剂可抑制蛋白变性。罗永康等^[26]研究加入抗冻剂对鲢鱼鱼糜在-20℃冷冻储藏4周后鱼糜凝胶持水力的变化时发现,分别加入6%乳酸钠、0.4%谷氨酸钠、0.5%糊精以及对照组的持水力分别从初始值96.5%、96.5%、96.3%和96.8%减小到90.4%、90.8%、75.5%和72%。糊精对凝胶持水力几乎没有作用,也就是对蛋白冷冻变性几乎没有抑制作用,而加入乳酸钠和谷氨酸钠可缓解蛋白变性,提高凝胶的持水力。Chou等^[27]报道,随着低聚木糖(XOS)加入量增加,凝胶持水力逐渐增强。当加入量增加到12%时,与对照组相比,可压出水分分

别为59.37%和66.76%,表明低聚木糖可抑制蛋白变性,增强凝胶的持水力。

4 结 语

鱼糜在冷冻储藏的过程中,由于肌原纤维蛋白发生变性或聚集,使得蛋白的功能性质和凝胶特性发生变化。加入抗冻剂后,可缓解蛋白冷冻变性,抑制蛋白空间构象发生变化,从而延缓冷冻引起的盐溶性蛋白含量、Ca²⁺-ATPase活性和巯基含量的降低,以及质构特性和持水力发生变化。基于鱼糜蛋白冷冻变性机理,研究新型抗冻剂以解决目前商业抗冻剂(蔗糖-山梨醇)造成的产品过甜和能量值过高的问题具有现实意义。

参考文献:

- [1] 方竞. 鱼肉蛋白冷冻变性机理、测定方法及防止措施[J]. 福建水产, 2001(3): 67-71.
- [2] 杨武海. 影响鱼肉蛋白质冷冻性的因素及防止变性的措施[J]. 福建水产, 2001(2): 53-54.
- [3] XIONG Guanquan, CHENG Wei, YE Lixiu, et al. Effects of konjac glucomannan on physicochemical properties of myofibrillar protein and surimi gels from grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. Food Chemistry, 2009, 116: 413-418.
- [4] SULTANBAWA Y, LI-CHAN E C Y. Cryoprotective effects of sugar and polyol blends in ling cod surimi during frozen storage[J]. Food Research International, 1998, 31(2): 87-98.
- [5] LIAN P Z, LEE C M, HUFNAGEL L. Physicochemical properties of frozen red hake (*Urophycis chuss*) mince as affected by cryoprotective ingredients[J]. Food Science, 2000, 65(7): 1117-1123.
- [6] PARK J W, LANIER T C. Combined effects of phosphates and sugar of polyol on protein stabilization of fish myofibril[J]. Food Science, 1987, 52: 1509-1519.
- [7] ZHOU Aimei, BENJAKUL S, PAN K, et al. Cryoprotective effects of trehalose and sodium lactate on tilapia (*Sarotherodon nilotica*) surimi during frozen storage[J]. Food Chemistry, 2006, 96: 96-103.
- [8] 谢超, 陶莉. 抗冻剂在冷冻鱼糜生产中的应用[J]. 食品与发酵工业, 2008, 34(9): 93-95.
- [9] BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, TUEKSUBAN J. Changes in physico-chemical properties and gel-forming ability of lizardfish (*Saurida tumbil*) during post-mortem storage in ice[J]. Food Chemistry, 2003, 80: 535-544.
- [10] MacDONALD G A, LANIER T C. Actomyosin stabilization to freeze: thaw and heat denaturation by lactate salts[J]. Food Science, 1994, 59: 101-105.
- [11] HERRERA J R, MACKIE I M. Cryoprotection of frozen-stored actomyosin of farmed rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) by some sugars and polyols[J]. Food Chemistry, 2004, 84: 91-97.
- [12] SOMJIT K, RUTTANAPORNWAREESAKUL Y, HARA K, et al. The cryoprotectant effect of shrimp chitin and shrimp chitin hydrolysate on denaturation and unfrozen water of lizardfish surimi during frozen storage[J]. Food Research International, 2005, 38: 345-355.
- [13] SULTANBAWA Y, LI-CHAN E C Y. Structural changes in natural actomyosin and surimi from Ling cod (*Ophiodon elongates*) during frozen storage in the absence or presence of cryoprotectants[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2001, 49: 4716-4725.

- [14] 周爱梅, 龚杰, 邢彩云, 等. 罗非鱼与鳙鱼鱼糜蛋白在冻藏中的生化及凝胶特性变化[J]. 华南农业大学学报, 2005, 26(3): 103-107.
- [15] 周爱梅, 龚翠, 曹环, 等. 几种新型抗冻剂对鲢鱼鱼糜蛋白抗冻效果研究[J]. 食品工业科技, 2010(11): 85-89.
- [16] HUIDOBRO A, ALVAREZ C, TEJADA M. Hake muscle altered by frozen storage as affected by added ingredients[J]. Food Science, 1998, 63(4): 638-643.
- [17] OWUSU-ANSAH Y J, HULTIN H O. Effect of *in situ* formaldehyde production on solubility and cross linking of proteins of minced red hake muscle during frozen storage[J]. Food Biochemistry, 1987, 11(1): 17-39.
- [18] 刘欣, 周爱梅, 赵力超, 等. 海藻糖、乳酸钠对冻藏鳙鱼鱼糜蛋白抗冻效果的影响[J]. 食品与发酵工业, 2007, 33(8): 61-64.
- [19] 薛勇. 鳙鱼鱼糜抗冻变性剂及土腥味脱除方法的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.
- [20] BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, THONGKAEW C, et al. Comparative study on physicochemical changes of muscle proteins from some tropical fish during frozen storage[J]. Food Research International, 2003, 36(8): 787-795.
- [21] RUTTANAPORNVAREESAKUL Y, SOMJIT K, OTSUKA A, et al. Cryoprotective effects of shrimp head protein hydrolysate on gel forming ability and protein denaturation of lizardfish surimi during frozen storage [J]. Fisheries Science, 2006, 72:421-428.
- [22] AUH J H, LEE H G, KIM J W, et al. Highly concentrated branched oligosaccharides as cryoprotectant for surimi[J]. Journal of Food Science, 1999, 64: 418-422.
- [23] 刘艺杰, 薛长湖, 薛勇, 等. 鱼排酶解物对鳙鱼鱼糜冻藏过程中蛋白质变性的影响[J]. 中国水产科学, 2005, 12(5): 632-637.
- [24] 刘慧, 李开雄, 付翠萍. 反复冻融对鲢鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. 农产品加工, 2010(4): 17-20.
- [25] 汪之和, 陈明洲, 顾红梅, 等. 漂洗工艺和抗冻剂对几种西非鱼鱼糜凝胶特性和色泽的影响[J]. 中国水产科学, 2001, 22(2): 539-543.
- [26] 罗永康, 周新华. 鲢鱼蛋白质低温变性保护剂的研究[J]. 食品科学, 1996, 17(1): 59-62.
- [27] CHOU Y T, LIN K W. Effects of xylooligosaccharides and sugars on the functionality of porcine myofibrillar proteins during heating and frozen storage[J]. Food Chemistry, 2010, 121: 127-131.