

罗非鱼与鳙鱼鱼糜蛋白在冻藏中的 生化及凝胶特性变化

周爱梅, 龚 杰, 邢彩云, 刘 欣, 陈永泉

(华南农业大学 食品学院, 广东 广州 510642)

摘要: 研究了罗非鱼鱼糜和鳙鱼鱼糜蛋白在 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冻藏过程中的生化变化和凝胶性能的变化。结果表明: 随着冻藏时间的延长, 2 种淡水鱼鱼糜蛋白的盐溶性、 Ca^{2+} -ATPase 活性及巯基含量均下降, 而二硫键含量及表面疏水性却增加; 冻藏 63 d 后, 罗非鱼鱼糜的盐溶性蛋白含量、 Ca^{2+} -ATPase 活性及巯基含量分别降低了 45.5%、100% 和 12.5%, 而鳙鱼鱼糜则分别降低了 43.0%、43.5% 和 25.6%; 另一方面, 罗非鱼鱼糜二硫键含量和表面疏水性分别增加了 222.1% 和 173.2%, 而鳙鱼鱼糜则分别增加了 27.7% 和 142.1%; 冻藏还导致 2 种鱼糜蛋白凝胶性能的下降, 冻藏 63 d 后, 罗非鱼鱼糜和鳙鱼鱼糜的凝胶强度依次降低了 65.1% 和 62.3%。因此, 冻藏易导致 2 种淡水鱼糜的蛋白质变性; 从上述指标的变化来看, 罗非鱼鱼糜的冻藏稳定性比鳙鱼鱼糜稍差。

关键词: 罗非鱼鱼糜; 鳙鱼鱼糜; 生化特性; 凝胶特性

中图分类号: S984.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-411X(2005)03-0103-05

Changes in biochemical and gelling properties of tilapia and bighead surimi during frozen storage

ZHOU Ai-mei, GONG Jie, XING Cai-yun, LIU Xin, CHEN Yong-quan

(College of Food Science, South China Agric. Univ., Guangzhou 510642, China)

Abstract: The biochemical and gelling property changes of tilapia and bighead surimi during frozen storage at $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ were investigated in this work. The results showed the solubility, Ca^{2+} -ATPase activity and sulfhydryl content of surimi from both species all decreased as the storage time was extended, while the disulfide bond content and surface hydrophobicity increased. After being stored at $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 63 days, salt extractable protein, Ca^{2+} -ATPase activity and sulfhydryl content of surimi from tilapia declined by 45.5%, 100% and 12.5% respectively, while those of bighead surimi decreased by 43.0%, 43.5% and 25.6%. On the other hand, disulfide bond content and surface hydrophobicity of surimi from tilapia increased by 222.1% and 173.2% respectively, while those of bighead surimi rose by 27.7% and 142.1%. Frozen storage also induced the deterioration of gel-forming ability of both surimi. The strength of tilapia and bighead surimi gels decreased by 65.1% and 62.3% respectively after 63 days storage at $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Therefore, frozen storage caused protein denaturation of surimi from both species. From the changes of the above indicators, it could be seen that the stability of tilapia surimi was slightly inferior to that of bighead surimi during frozen storage.

Key words: tilapia surimi; bighead surimi; biochemical properties; gel properties

自从日本在 20 世纪 60 年代初开发出冷冻鱼糜后, 冷冻鱼糜就成了生产鱼糜制品的新型原料。相对于新鲜鱼, 冷冻鱼糜作为鱼糜制品的原料具有很多

优点, 如可为鱼糜制品加工业提供质量稳定的原料, 使其生产不受季节和地域的限制; 可使鱼糜制品加工工艺简化、产品多样化; 有利于下脚料和污水的集

中处理及综合利用等^[1]。目前生产冷冻鱼糜的原料主要为阿拉斯加狭鳕、太平洋鳕等海水鱼^[2]。但由于以往过度的海洋捕捞及环境污染等原因,目前海洋经济鱼类已严重枯竭,满足不了冷冻鱼糜生产的需要。与此相反,世界淡水鱼的养殖产量则持续增加^[3]。因此,开发淡水鱼冷冻鱼糜是鱼糜加工业的重要课题。

我国是世界上淡水鱼产量最大的国家。在我国的淡水鱼中,罗非鱼的产量增长非常快,到2002年我国罗非鱼产量已达到70.7万t,比1998年的53万t约增加33%^[4]。罗非鱼具有“21世纪之鱼”的美称,其营养价值高^[5]。但目前我国罗非鱼的加工还非常有限。鳊鱼是我国产量最大的淡水鱼之一,其营养价值也很丰富^[6]。但由于在我国,有利用鳊鱼头煲“鱼头汤”的习惯,造成鳊鱼鱼头价格较高,而去除鱼头后的鱼身则价格很低,甚至由于滞销而被大量舍弃,造成很大的浪费。因此,如果能将罗非鱼和鳊鱼加工成冷冻鱼糜,一方面可实现对罗非鱼和鳊鱼的综合利用,提高其经济价值,另一方面又可为冷冻鱼糜加工业提供新的原料。而要开发淡水冷冻鱼糜,首先应对其冻藏稳定性进行研究,研究其加工冷冻鱼糜的原料适合性。这方面的研究目前国内还鲜见报道。国外近几年对海水鱼全鱼及鱼片在冻藏过程中的稳定性进行了较多的研究^[7,8],但对鱼糜的相关研究不多,对淡水鱼糜的研究则更少。因此,本研究以罗非鱼和鳊鱼鱼糜为研究对象,研究其在冻藏过程中的生化及凝胶特性的变化,探讨其冻藏稳定性,以期能为开发淡水鱼冷冻鱼糜提供有益的参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

罗非鱼鱼糜、鳊鱼鱼糜由广东省南海西樵水产品加工厂提供,置于-18℃冻藏备用;三磷酸腺苷二钠(ATP)、牛血清白蛋白、三羟甲基氨基甲烷(Tris)、十二烷基硫酸钠(SDS)、5,5'-二硫代双(2-硝基苯甲酸)(DTNB)、1-苯萘氨-8-磺酸(ANS)等均为市售分析纯或生化试剂。

1.2 试验方法

1.2.1 盐溶性蛋白的测定 按参考文献[9]的方法,高离子磷酸盐浸提液中的蛋白质含量减去低离子磷酸盐浸提液中的蛋白质含量即为盐溶性蛋白质含量,试验重复3次。

1.2.2 Ca^{2+} -ATPase 活性的测定 提取肌动球蛋白参考文献[10]的方法, Ca^{2+} -ATPase 活性以每毫克蛋白质在每分钟内生成的无机磷(Pi)的量($\mu\text{mol}\cdot\text{mg}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$)来表示,其中无机磷含量测定采

用钼酸铵法^[11],试验重复3次。

1.2.3 总巯基(-SH)含量的测定 参考文献[10]的方法,巯基含量以每千克鱼糜蛋白中巯基的质量摩尔浓度表示,单位为 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,试验重复3次。

1.2.4 二硫键(S-S)含量的测定 参考文献[8]的方法,二硫键含量以每千克鱼糜蛋白中二硫键的质量摩尔浓度表示,单位为 $\text{mmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,试验重复3次。

1.2.5 表面疏水性的测定 参考文献[10]的方法,表面疏水性($S_0\text{ANS}$)以荧光强度与蛋白质浓度对应的曲线的斜率来表示,试验重复2次。

1.2.6 蛋白质含量的测定 参考文献[8]的方法,用牛血清白蛋白做标准蛋白质,试验重复3次。

1.2.7 鱼糜凝胶的制备 参考文献[12]的方法。

1.2.8 鱼糜凝胶破断强度、凹陷深度及凝胶强度的测定 按文献[12]的方法,破断强度和凹陷深度由TA·XT2I/25质构仪(英国SMS公司)直接测定(检测条件:圆柱压头直径5mm,压速1.3mm/s,施加重量为5kg);凝胶强度则为破断强度和凹陷深度的乘积,试验重复3次。

1.2.9 数据统计分析 所有数据都进行单因素方差分析,使用软件为Static Analysis System (SARS 1997),分析程序为Duncan's multiple-range。

2 结果与讨论

2.1 冻藏过程中鱼糜盐溶性蛋白含量的变化

试验结果如图1所示,随着冻藏时间的延长,罗非鱼和鳊鱼鱼糜的盐溶性蛋白含量均下降,在冻藏开始的21d内下降比较显著($P<0.05$),分别约下降了41.8%和40.6%;随后鳊鱼鱼糜的下降不显著($P>0.05$),而罗非鱼鱼糜的下降在21~35d及49~63d不明显($P>0.05$),但在35~49d,下降趋势较显著($P<0.05$);冻藏63d后,罗非鱼和鳊鱼鱼糜的盐溶性蛋白含量分别下降了45.5%和43.0%,二者的下降程度接近($P>0.05$)。蛋白质的盐溶性是反映鱼肉或鱼糜蛋白变性的常用指标,在冻藏过程中由于氢键、疏水键、二硫键、盐键的形成往往会导致蛋白质盐溶性的下降,且其下降程度与鱼种有关^[13,14]。试验结果说明,罗非鱼和鳊鱼鱼糜蛋白在-18℃冻藏7d即会发生显著的变性,且在0~21d随时间增加,变性越严重,之后随时间增加,变性程度也略有增大。类似的结果在一些海水鱼糜中也存在。如Sych等^[15]在研究中发现,大西洋鳕鱼糜在-20℃冻藏14和42d后,盐溶性蛋白的含量分别下降了23%和47.5%;Sultanbawa等^[16]研究表明,蓝鳕鱼糜蛋白在-18℃冻藏120d,其盐溶性蛋白质量分数从60%下降到19%。

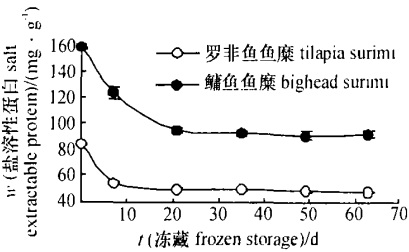


图 1 罗非鱼和鳙鱼鱼糜在-18 °C冻藏中盐溶性蛋白含量的变化

Fig. 1 Changes of salt extractable protein content of tilapia and bighead surimi during frozen storage at -18 °C

2.2 冻藏过程中鱼糜Ca²⁺-ATPase活性的变化

由图 2 可知, 鳙鱼鱼糜肌动球蛋白的Ca²⁺-ATPase活性在整个冻藏过程中显著下降($P<0.05$); 而罗非鱼鱼糜冻藏 0~21 d, 其Ca²⁺-ATPase活性也显著下降($P<0.05$), 21~49 d 下降不明显($P>0.05$), 但到第 63 d 已检测不到活性; 冻藏 63 d 后, 罗非鱼和鳙鱼鱼糜的Ca²⁺-ATPase活性分别降低了 100%和 43.5%, 以前者下降更显著($P<0.05$). 图 2 还表明, 2 种淡水鱼糜肌动球蛋白在新鲜状态时的Ca²⁺-ATPase活性不同, 其中, 鳙鱼鱼糜比罗非鱼鱼糜高, 这可能是由于不同鱼肉蛋白质的天然结构及其在处理过程中变性的难易程度不同所致^[8].

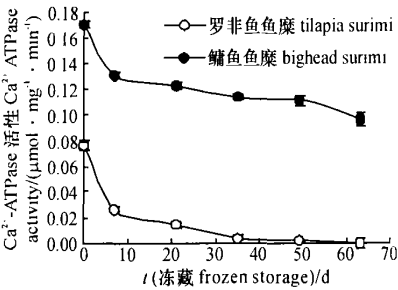


图 2 罗非鱼和鳙鱼鱼糜在-18 °C冻藏中肌动球蛋白Ca²⁺-ATPase活性的变化

Fig. 2 Changes of Ca²⁺-ATPase activity of actomyosin extracted from tilapia and bighead surimi during frozen storage at -18 °C

鱼肉肌球蛋白的球状头部具有Ca²⁺-ATPase活性, 此活性是反映肌球蛋白完整性的一个重要指标^[10, 17, 18]. 在本试验的冻藏过程中, 2 种淡水鱼糜的Ca²⁺-ATPase活性下降表明冻藏会导致其肌球蛋白尤其是肌球蛋白的头部变性. 类似的结果在某些海水鱼肉和鱼糜中也出现^[8, 13, 19]. Benjakul等^[8]研究发现长蛇鲭、石首鱼、马鲛鱼和大眼海鲈鱼 4 种海水鱼在-18 °C冻藏 168 d 后, 其肌肉蛋白的Ca²⁺-ATPase活性分别下降了 72.1%、51.7%、53.4%和 42.8%, 并推测该活性的下降可能是由于肌球蛋白头部的结构

发生了改变或聚集所致. 在冻藏过程中冰晶的形成及由此所带来的体系离子强度的升高都会导致肌球蛋白头部结构发生改变, 从而使其Ca²⁺-ATPase活性下降^[10]; 蛋白质-蛋白质相互作用所引起的蛋白质分子重排及肌球蛋白活性部位的一SH发生氧化也可能导致肌球蛋白Ca²⁺-ATPase活性下降^[14].

2.3 冻藏过程中鱼糜总巯基和二硫键含量的变化

图 3-a 表明, 在冻藏过程中, 罗非鱼和鳙鱼鱼糜肌动球蛋白的总巯基含量随着时间的延长整体上都呈下降趋势; 其中鳙鱼鱼糜在冻藏的 0~21 d 内下降比较明显($P<0.05$), 下降了 24.3%, 之后随着时间的进一步增加, 下降速度较慢($P>0.05$); 而罗非鱼鱼糜在整个冻藏过程中的下降趋势都较缓慢, 其中 0~7、21~49 d 内下降较明显($P<0.05$); 冻藏 63 d 后, 2 种淡水鱼糜的总巯基含量分别下降了 25.6%和 12.5%, 以鳙鱼鱼糜的下降趋势更明显($P<0.05$). 从图 3-a 还可看出, 2 种淡水鱼糜在冻藏过程中的巯基含量不同, 这可能是由于不同鱼肉蛋白的巯基对氧化的敏感性不同所致^[8]. 巯基是鱼肉蛋白中最具反应活性的功能性基团^[20], 它在冰藏、冻藏或冷冻-解冻过程中易发生氧化或与二硫键交换而引起其含量下降^[10, 19~21]. 此外, 蛋白质聚合体的形成会覆盖一些巯基, 使能够检测到的游离巯基减少, 从而也可能导致巯基含量下降^[8].

从图 3-b 发现, 在整个冻藏过程中, 2 种淡水鱼糜的肌动球蛋白不断有二硫键形成, 且其二硫键含量和变化趋势不相同. 鳙鱼鱼糜起始的二硫键含量比罗非鱼鱼糜高($P<0.05$), 在冻藏的 0~21 d 增加明显($P<0.05$), 之后增加幅度不大($P>0.05$); 罗非鱼鱼糜在冻藏开始的 7 d 内增加较明显($P<0.05$), 而在 21~49 d 内增加趋势比较平缓, 49 d 后却显著增加($P<0.05$); 冻藏 63 d 后, 2 种鱼糜的二硫键含量分别增加了 27.7%和 222.1%, 以罗非鱼鱼糜增加更明显($P<0.05$). 此外, 二硫键含量的增加与巯基含量的下降存在一定的相关性(图 3-b), 说明在冻藏过程中肌球蛋白分子的变性尤其是结构的改变可能导致了一些活性巯基的暴露, 这些暴露的活性巯基发生氧化而引起二硫键含量增加^[8].

综合图 2 和图 3 可以看出, 2 种淡水鱼糜肌动球蛋白的巯基和二硫键含量的变化与Ca²⁺-ATPase活性的变化也存在一定的相关性. 鱼肉肌球蛋白分子中含有活性巯基, 其中位于头部的巯基(-SH₁和 -SH₂)对其Ca²⁺-ATPase活性起着重要的作用, 这些巯基的氧化会导致其Ca²⁺-ATPase活性下降^[21]. 此外, 位于肌球蛋白其他部位的巯基的氧化也可能引起其Ca²⁺-ATPase活性下降^[23].

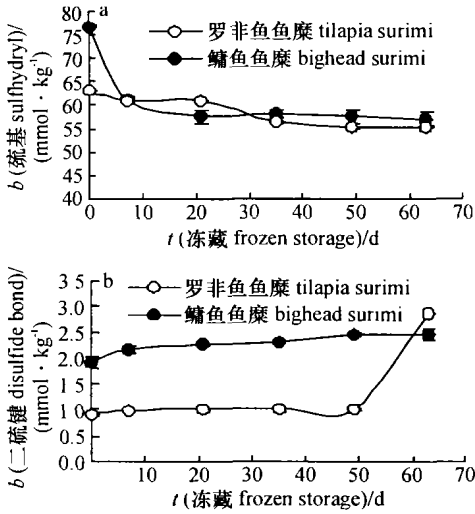


图 3 罗非鱼和鳙鱼鱼糜在-18 °C冻藏中肌动球蛋白巯基含量(a)和二硫键含量(b)的变化
Fig. 3 Changes of sulfhydryl content (a) and disulfide bond content (b) of actomyosin extracted from tilapia and bighead surimi during frozen storage at -18 °C

2.4 冻藏过程中鱼糜表面疏水性的变化

试验结果如图 4 所示,从图 4 可知,随着冻藏时间的增加,罗非鱼鱼糜和鳙鱼鱼糜肌动球蛋白的表面疏水性整体上均增加,冻藏 63 d 后,分别增加了 173.2%和 142.1%,以罗非鱼鱼糜增加幅度大($P<0.05$).这可能是由于蛋白质变性使原先位于蛋白质分子内部的疏水性氨基酸残基暴露出来,从而导致了表面疏水性的增加^[14].

结合图 4 和图 1 还可以看出,2 种淡水鱼糜表面疏水性的变化与蛋白质盐溶性的变化存在一定的相关性,说明蛋白质内部的疏水性氨基酸残基暴露后相互之间可能通过疏水键发生作用形成蛋白质聚集体,从而导致蛋白质盐溶性下降. Benjakul 等^[8]研究也发现,在-18 °C冻藏过程中,石首鱼、马鲛鱼和大眼海鲈鱼 3 种海鱼肌肉蛋白的表面疏水性均随着冻藏时间的延长而显著增加,并与肌肉蛋白盐溶性的变化相一致.

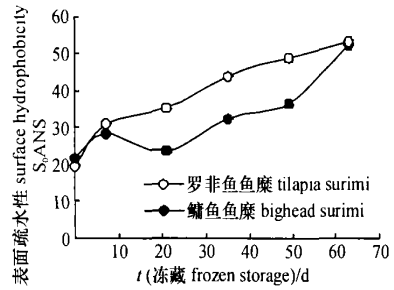


图 4 罗非鱼和鳙鱼鱼糜在-18 °C冻藏中肌动球蛋白表面疏水性的变化
Fig. 4 Changes of surface hydrophobicity of actomyosin extracted from tilapia and bighead surimi during frozen storage at -18 °C

2.5 冻藏过程中鱼糜凝胶特性的变化

图 5-a 表明,罗非鱼鱼糜的凝胶破断强度在冻藏的 0~35 d 内随时间显著下降($P<0.05$),随后下降程度较小($P>0.05$);而鳙鱼鱼糜在开始的 0~21 d 内凝胶破断强度下降显著($P<0.05$),之后下降程度也较慢($P>0.05$);冻藏 63 d 后,2 种淡水鱼糜的凝胶破断强度分别下降了 51.0%和 25.0%,以罗非鱼鱼糜下降程度更大($P<0.05$).从图 5-b 可以看出,2 种淡水鱼糜凝胶的凹陷深度也随着冻藏时间而变化,其中罗非鱼鱼糜凝胶的凹陷深度在冻藏的 0~49 d 内下降明显($P<0.05$),之后变化不大($P>0.05$);鳙鱼鱼糜在冻藏的 0~21 d 内下降显著($P<0.05$),21~35 d 下降不明显($P>0.05$),35 d 后下降幅度又大($P<0.05$);冻藏 63 d 后,2 种淡水鱼糜凝胶的凹陷深度依次下降了 29.3%和 49.7%,以鳙鱼鱼糜下降更显著($P<0.05$).从 2 种鱼糜的综合凝胶特性(即从凝胶强度)看,罗非鱼鱼糜在冻藏前的凝胶强度比鳙鱼鱼糜高(图 5-c),但在冻藏过程中其凝胶强度显著下降($P<0.05$),到 49 d 后,下降程度较小($P>0.05$);而鳙鱼鱼糜的凝胶强度在整个冻藏过程中均显著下降($P<0.05$);冻藏 63 d 后,2 种鱼糜的凝胶强度分别下降了 65.1%和 62.3%,以罗非鱼鱼糜下降趋势更明显($P<0.05$).

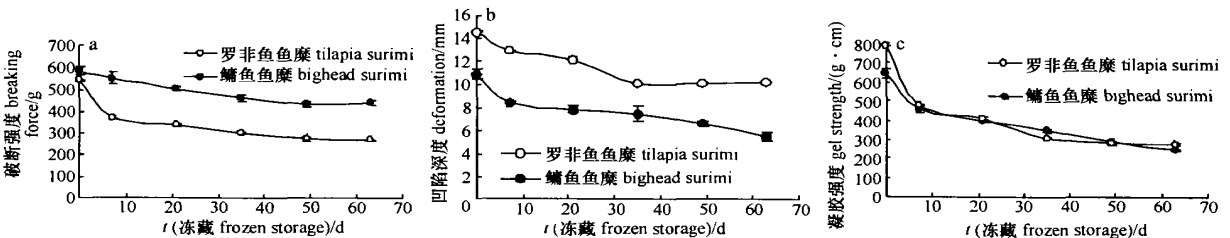


图 5 罗非鱼和鳙鱼鱼糜在-18 °C冻藏中凝胶破断强度(a)、凹陷深度(b)和凝胶强度(c)的变化
Fig. 5 Changes in the breaking force (a), deformation (b) and gel strength (c) of tilapia and bighead surimi gels during frozen storage at -18 °C

类似的结果在别的研究中也存在^[13 15~17]。凝胶特性是反映鱼糜蛋白在冻藏过程中是否发生变性及变性程度的最直接的指标。在冰藏或冻藏过程中, 鱼糜蛋白的聚集变性会导致其凝胶能力下降^[17]。An 等^[24] 研究指出, 肌球蛋白的完整性对鱼糜的凝胶能力起着非常重要的作用, 因此肌球蛋白在冰藏或冻藏过程中发生变性或降解, 都会导致其凝胶特性的下降。本研究结果发现, 2 种淡水鱼糜凝胶特性的劣变与其盐溶性蛋白的下降和二硫键及表面疏水性的增加存在一定的相关性, 表明 2 种鱼糜蛋白通过二硫键或疏水键发生聚集可能是导致其凝胶能力下降的一个重要原因。

3 结论

罗非鱼和鳙鱼鱼糜蛋白在-18℃冻藏过程中易发生变性, 其主要功能特性如蛋白质的盐溶性、Ca²⁺-ATPase 活性、巯基含量均随着冻藏时间的增加而下降, 而二硫键和表面疏水性却增加。蛋白质这些生化特性的变化, 最后导致其凝胶能力的劣化。从大多数指标的变化来看, 罗非鱼鱼糜在冻藏过程中的变性程度比鳙鱼鱼糜稍大。

参考文献:

[1] 周爱梅, 曾庆孝, 刘欣, 等. 冷冻鱼糜蛋白在冻藏中的物理化学变化及其影响因素[J]. 食品科学, 2004, 25 (8): 50—54.

[2] JAE W P. Surimi and surimi seafood[M]. New York: Marcel Dekker, Inc, 2000. 1—21.

[3] 张俊杰, 曾庆孝. 我国淡水鱼鱼糜的研究情况[J]. 食品与发酵工业, 2002, 28(9): 57—63.

[4] 李思发. 我国罗非鱼产业的发展前景和瓶颈问题[J]. 科学养鱼, 2003 (9): 3—5.

[5] 邱刚. 我国罗非鱼产业化发展面临的问题与建议[J]. 中国渔业经济, 2002 (4): 17—18.

[6] 周桂. 鲢鳙鱼在膨化食品中的应用[J]. 广西民族学院学报(自然科学版), 1997, 3(2): 146—149.

[7] BADII F, HOWELL N K. A comparison of biochemical changes in cod (*Gadus morhua*) and haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) fillets during frozen storage[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2001, 82(1): 87—97.

[8] 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: 787—795.

[9] 汪之和, 王士造, 王菁磊. 防止白鲢鱼糜蛋白冷冻变性的研究[J]. 水产科技情报, 1996 23(4): 173—177.

[10] BENJAKUL S, SEYMOUR T A, MORRISSEY M T. Physicochemical changes in pacific whiting muscle proteins during iced storage[J]. Journal of Food Science, 1997, 62(4):

729—733.

[11] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 第 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2003. 50—52.

[12] 周爱梅, 黄文华, 刘欣, 等. 转谷氨酰胺酶对鳙鱼鱼糜凝胶特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2003, 29(8): 27—31.

[13] 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(3): 418—422.

[14] BENJAKUL S, BAUER F. Physicochemical and enzymatic changes of cod muscle proteins subjected to different freeze-thaw cycles[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2000, 80(8): 1 143—1 150.

[15] SYCH J, CARRIER M. Detemination of optimal level of lactitol for surim[J]. Journal of Food Science, 1991, 56(2): 285—290, 295.

[16] 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.

[17] 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.

[18] ROURA S L, CRUPKIN M. Biochemical and functional properties of myofibrils from pre- and post-spawned hake (*Merluccius hubbsi Marini*)[J]. Journal of Food Science, 1995, 60(2): 269—272.

[19] RAMIREZ J A, MARTIN-POLO M O, BANDMAN E. Fish myosin aggregation as affected by freezing and initial physical state[J]. Journal of Food Science, 2000, 65(4): 556—560.

[20] SULTANBAWA Y, LI-CHAN E C Y. Structural changes in natural actomyosin and surimi from ling cod (*Ophiodon elongatus*) during frozen storage in the absence or presence of cryoprotectants[J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry, 2001, 49(10): 4 716—4 725.

[21] LEBLANC E L, LEBLANC R J. Detemination of hydrophobicity and reactive groups in proteins of cod (*Gadus morhua*) muscle during frozen storage[J]. Food Chemistry, 1992, 43: 3—11.

[22] CHAN J K, GILL T A, THOMPSON J W, et al. Herring surimi during low temperature setting: physicochemical and textural properties[J]. Journal of Food Science, 1995, 60 (6): 1 248—1 253.

[23] SOMPONGSE E, ITOH Y, OBATAKE A. Effect of cryoprotectants and reducing reagent the stability of actomyosin during ice storage[J]. Fisheries Science, 1996, 62: 110—113.

[24] AN H, PETERS M Y, SEYMOUR T A. Roles of endogenous enzymes in surimi gelation[J]. Trends in Food Science and Technology, 1996, 7: 321—327.

【责任编辑 李晓卉】