不同漂洗处理后冻藏对鲤鱼蛋白功能特性的影响

李艳青[1,2]，孔保华[2]，夏秀芳[2]，陈洪生[1]
（1.黑龙江八一农垦大学食品学院，黑龙江大庆 163319）（2.东北农业大学食品学院，黑龙江哈尔滨 150030）

摘要：蛋白质氧化是引起食品加工及贮藏过程中品质发生劣变的一个主要原因。本文以鲤鱼肉为研究对象，主要研究鱼糜加工过程中经不同漂洗处理后冻藏对鲤鱼肌原纤维蛋白功能特性的影响。把鱼肉经不同方式漂洗（未漂洗；传统漂洗；添加抗坏血酸钠漂洗；添加没食子酸丙酯（PG）漂洗）后置于-25 ℃，经不同时间（0、30、60、90、120 d）冷冻贮藏后，利用质构仪、电子显微镜、流变仪等设备对鲤鱼肌原纤维蛋白乳化性、凝胶性以及流变性等指标进行测定，结果表明冻藏过程中发生的蛋白质氧化会引起鲤鱼肌原纤维蛋白各项功能特性降低，在漂洗过程中加入PG处理的鱼肉功能特性改变最小，说明添加PG漂洗可以有效地抑制蛋白质氧化的发生，从而减少鲤鱼肌原纤维蛋白功能特性的改变。

关键词：冻藏；蛋白质氧化；乳化性；凝胶性；流变性

文章篇号：1673-9078(2014)9-166-172 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2014.09.028

Effect of Frozen Storage After Different Washing Methods on Functional Properties of Myofibrillar Proteins in *Cyprinuscarpio*

LI Yan-qing[1,2], KONG Bao-hua[2], XIA Xiu-fang[2], CHEN Hong-sheng[1]
(1.College of Food Science, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)
(2.College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: Protein oxidation is the leading cause of quality deterioration during processing and storage of food. In this study, the effects of different washing methods, followed by storage under frozen conditions, on myofibrillar proteins (MPs) of common carp (*Cyprinuscarpio*) meat was examined. Fish meat was stored at -25 ℃ for 0, 30, 60, 90, and 120 d after it was washed using traditional washing, washing with sodium ascorbate, and washing with propyl gallate [PG] or left unwashed, respectively. The emulsifying properties, gelation properties, and rheological properties of MPs in common carp were evaluated using texture analyzer, electron microscope, and rheometer. The results showed that protein oxidation during frozen storage significantly reduced the functional properties of MPs in common carp ($P < 0.05$) butthe change could be minimized by washing with PG. This indicates that addition of PG during washing could effectively inhibit the occurrence of protein oxidation, thus reducing the changes in functional properties of MPs in common carp.

Key words: frozen storage; protein oxidation; emulsifying properties; gelation properties; rheological properties

目前，在鱼制品加工中，国内外发展较快的是鱼糜类制品，在国内已有一定规模的产业化生产企业，产品主要有有鱼丸、鱼卷、鱼糕、冷冻鱼糜等。鱼糜制品具有蛋白质含量高、脂肪含量低、口感鲜嫩等特点，产量在逐年增加，我国沿海和内陆水域辽阔，水产资源非常丰富，占国土面积的1.8%，因而我国的淡水鱼产业十分的发达[1,2]。而在我国淡水渔业中，鲤鱼所占比例相当大，是我国居民食物的重要组成部分，是主要的动物蛋白质来源之一。因此以鲤鱼为原料生产鱼糜制品具有较广阔的前景。

收稿日期：2014-04-15
基金项目：黑龙江省自然科学基金资助项目（C201122）
作者简介：李艳青（1978-），女，博士，副教授，研究方向：畜产品加工
通讯作者：孔保华（1963-），女，博士，教授，研究方向：畜产品加工

鱼糜制品在生产过程中一般要经历漂洗、冻藏等过程，在冻藏过程中容易引起鱼糜制品品质的劣变，实验研究表明这主要是由蛋白酶分解、脂肪氧化、蛋白质氧化等原因引起的[2~3]。

近几年，由蛋白氧化引起的食品功能特性变化已经引起人们的普遍关注，目前对肌肉蛋白（包括鸡肉、牛肉和鱼肉）的研究表明，氧化可以提高或降低肌肉蛋白的凝胶和乳化性，这与具体的氧化条件有关[4~6]。当肉和肉制品暴露在强氧化条件时，会引起氨基酸的损失而降低其品质[7]。

在鱼糜冷冻保藏过程中蛋白质的氧化问题会给其营养价值及食用口感带来很大的影响。国内关于冷冻引起蛋白质氧化的研究还相对较少，蛋白质的氧化对其结构和功能特性的影响问题还没有深入的研究。本

试验前期主要研究了经不同漂洗处理的鲤鱼肌原纤维蛋白在冻藏过程中理化特性的改变，实验结果得出，随着冻藏时间的延长，蛋白质羰基含量、二聚酪氨酸含量逐渐增加，而总巯基含量逐渐减少，这说明鲤鱼肌原纤维蛋白在冻藏过程中发生了氧化变性，导致了其理化性质和结构的改变，而结构的变化势必又会影响其功能特性，因此本试验主要研究冻藏过程中引发的蛋白质氧化对鱼糜肌原纤维蛋白功能特性质的影响，并寻找抑制蛋白质氧化的方法，对提高冻藏鱼糜品质具有一定的理论指导意义。

1 材料与方法

1.1 材料

新鲜鲤鱼（1.5~2.0 kg）购买于哈尔滨香坊区农贸市场，用保鲜盒运到东北农业大学食品学院实验室。试验所用试剂均为分析纯，购买于哈尔滨市万太生物药品公司。

1.2 仪器设备

AL104 精密电子天平、DK-S24 型电热恒温水浴锅、LG10-24A 高速离心机、TU-1800 紫外可见光分光光度计、冷冻离心机、WSC-S 测色色差计、TA-XT plus 型质构分析仪，MAL1038384 流变仪。

1.3 实验方法

1.3.1 样品处理

尸僵后的鲤鱼鱼肉在低温下（0~4 ℃）用小型绞肉机制作成鱼糜，取其中一部分分成 4 份，分别经以下条件漂洗：（1）未经漂洗；（2）传统方式（清水 2 次+0.5%NaCl 1 次）；（3）传统漂洗+抗坏血酸钠（0.5%）1 次；（4）传统漂洗+PG（0.5%）1 次。漂洗后的鱼糜，每份加入商业抗冻剂(4%蔗糖+4%山梨醇)混匀后随机分成 15 小份，分别包装，封口。所有样品放入-26 ℃冰箱中冷冻，经 0、30、60、90 和 180 d 冻藏后，在每个处理组中随机取 3 份测其功能指标。主要包括乳化性、凝胶特性（白度值、保水性、质构、凝胶微观结构）和流变学特性。

1.3.2 鲤鱼肌原纤维蛋白的提取

肌原纤维蛋白提取参照 chin[8]的方法。将鱼肉搅碎，加入 4 倍体积的 20 mmol/L 的冰磷酸盐缓冲溶液均质，均质 2 次，每次 30 s，时间间隔 30 s，将其在 4 ℃冷冻离心机中，8000 g 离心 10 min，除去上清液。取沉淀用 4 倍体积的 pH 7.5、20 mmol/L 的磷酸盐缓冲溶液清洗沉淀，重复 3 次，最后一次清洗后用 3 层纱布过滤，所得滤液离心。沉淀为肌原纤维蛋白样品，用凯氏定氮法测定其蛋白含量。

1.3.3 肌原纤维蛋白乳化性的测定

鲤鱼肌原纤维蛋白的乳化性质的测定采用浊度法[9]。肌原纤维蛋白溶解在0.1 M（pH 6.5）磷酸盐缓冲溶液中配制成蛋白浓度为1 mg/mL，将2.0 mL大豆油和8.0 mL蛋白溶液放入直径为中2.5 cm的塑料离心中用匀浆机（IKAT18）高速匀浆1 min，立即从距离心管底0.5 cm的地方取匀浆液50 μL（剩下的匀浆用备用），加入到5 mL 0.1% SDS溶液中，振荡混匀后用TU-1800紫外分光光度计在500 nm处测定吸光值记作A_0，匀浆后10 min再次在相同位置取匀浆液50 μL，加入到5 mL 0.1% SDS溶液中，振荡混匀后测定吸光值记做A_{10}，用0.1% SDS溶液作空白对照。肌原纤维蛋白匀浆液的乳化活力EAI（m^2/g）和乳化稳定性ESI（%），分别由下面公式来表示：

$$\mathrm{EAI}\ (m^2/g) = \frac{2\times 2.303}{C\times(1-\varphi)\times 10^4}\times A_0\times \mathrm{dilution}$$

$$\mathrm{ESI} = \frac{A_{10}}{A_0}\times 100$$

式中：A_{500}为500 nm处的吸光值；φ为油相体积分数(V/V)（φ = 0.2）；C为蛋白质浓度；A_0、A_{10}为乳状液在0 min、10 min的吸光值。

1.3.4 鲤鱼肌原纤维蛋白凝胶性测定

1.3.4.1 凝胶的制备

将提取的鲤鱼肌原纤维蛋白配制成40 mg/mL的溶液，将溶液放入25×40 mm（Dia.×L）密封的玻璃瓶中，保持胶面高度为25 mm。置于80 ℃的水浴锅中加热30 min，形成凝胶后取出用自来水冷却至室温，将凝胶贮藏在2~4 ℃的冰箱中过夜，待测。制备好的凝胶在每次分析前要放在室温下（20~25 ℃）平衡30 min[10]。

1.3.4.2 肌原纤维蛋白凝胶质构（TPA）的测定

肌原纤维蛋白凝胶从冰箱中取出，室温下放置 30 min，将待测样品置于测定平台上固定好，室温下利用 TA-XT plus 型质构分析仪进行测量。以质构剖面分析方法（Texture profile analyse，TPA）测定凝胶的硬度和弹性。

选用的物性仪参数如下：物性仪重力传感器（load cell）选择 5 kg，测定模式下选择下压距离为 10 mm（变形率为 40%），测试速度为 120 mm/min，探头型号选择 P/0.5（直径为 12 mm）。室温下进行检测，每个样品进行三次平行试验，取平均值。

1.3.4.3 凝胶白度值的测定

凝胶的白度值用色差计测定，计算公式如下：

$$\text{Whiteness} = 100 - \sqrt{(100-\text{L})^2 + \text{a}^2 + \text{b}^2}$$

1.3.4.4 肌原纤维蛋白凝胶持水性（WHC）测定

肌原纤维蛋白凝胶持水性（WBC）的测定根据 Salvador（2009）[11]的方法并做适当的修改。取 5 g 蛋白凝胶，放入 50 mL 的离心管底部，在 4 ℃下 3000 r/min 离心 10 min，测定凝胶离心前后的重量。所有样品重复三次取平均结果。结果以肌原纤维蛋白凝胶离心前后的重量百分数（*m*/*m*）计算。公式如下：

$$\text{WHC}(\%) = \frac{m_2 - m_0}{m_1 - m_0} \times 100$$

式中：m_0是离心管重量；m_1是离心前离心管和凝胶重量；m_2是离心后离心管和凝胶重量。

1.3.4.5 凝胶微观结构的观察

取待测凝胶样品，经样品预处理后，用 ES-2030（HITACHI）型冷冻干燥仪对样品进行干燥。扫描时将凝胶样品观察面向上粘贴在扫描电镜样品台上，用 E-1010（Giko）型离子溅射镀膜仪在样品表面镀上一层 15 nm 厚的金属膜（金或铂膜），将处理好的样品放入样品盒中待检，加速电压是 5 kV。在放大 1000 倍条件下进行扫描结果观察。

1.3.5 流变学特性测定

动力流变学试验通过测定贮存模量（Storage modulus，*G'*）和损失模量（Loss modulus，*G''*），可以阐明蛋白质凝胶和蛋白质网状结构形成的机理。测试方法依据 Xia 等（2010）[12]的方法并略作修改。将提取的鲤鱼肌原纤维蛋白溶解在 0.1 M NaCl 配制成 40 mg/mL 的溶液。在动态流变仪中使用直径为 60 mm 的平行板来实现小振幅的剪切测试，平行板间的空隙选择 1 mm，加热速率为 1 ℃/min，温度范围为 30 到 85 ℃，并保持 10 min，振荡频率为 1 Hz，应力振幅为 0.02。

1.4 数据分析

所得数据均为三次重复的平均值，用 Statistix 8.0（分析软件，St Paul，MN）进行数据分析，平均数之间显著性差异（P <0.05）通过 Turkey test 程序进行，用 Sigmaplot 11.0 作图。

2 结果与分析

2.1 经不同漂洗处理后冻藏对鲤鱼肌原纤维蛋白乳化性的影响

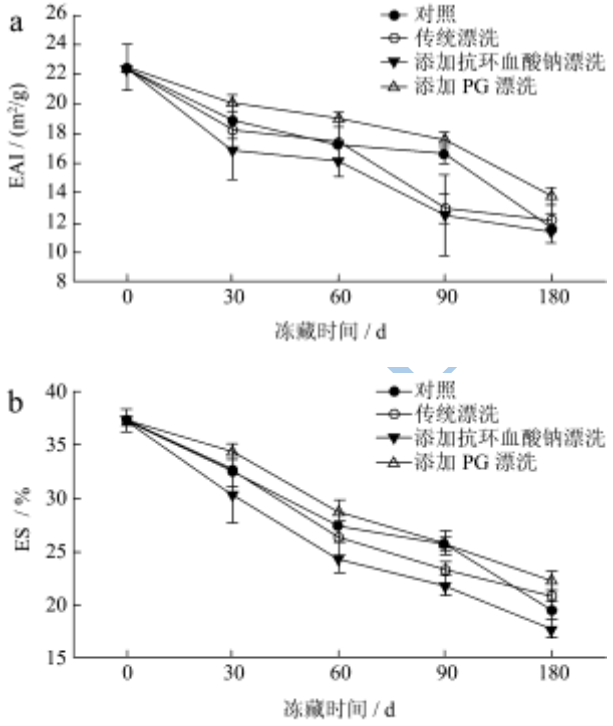


图 1 冻藏过程中鲤鱼肌原纤维蛋白乳化活性和乳化稳定性的变化

Fig.1 Changes of EAI and ESI of common carp MP during frozen storage

图 1a 是经过不同漂洗处理的样品在冻藏过程中鲤鱼肌原纤维蛋白乳化活性的变化。新鲜鲤鱼肌原纤维蛋白乳化活性为 22.50 m^2/g，经过 30、60、90 和 180 d 冻藏后，对照组的乳化活性下降了 15.41%、22.92%、25.93%和 46.72%；经过传统漂洗组样品的乳化活性下降了 18.43%、22.94%、42.35%和 45.92%；添加抗坏血酸钠漂洗的样品的乳化活性下降了 24.72%、27.83%、44.22%和 49.2%；添加 PG 漂洗的样品乳化活性下降了 10.71%、15.52%、21.73%和 38.61%（P<0.05）。图 1b 是经过不同漂洗处理的样品在冻藏过程中鲤鱼肌原纤维蛋白乳化稳定性的变化，其变化趋势与图 1a 中乳化活性变化趋势相似。

乳化性的降低的原因是由于冷冻引起了蛋白变性，肌球蛋白的交联程度增大，从而使蛋白丧失了表面吸附脂肪颗粒的能力。蛋白是表面乳化剂，冻藏后使冰晶不断的形成-长大-溶解，破坏了蛋白原有的结构，蛋白发生氧化而变性，蛋白出现交联和聚集现象，从而使这部分蛋白不能作为有效的表面活性剂，继而降低了蛋白的乳化稳定性。添加 PG 漂洗有效地延缓了蛋白结构的变化，对蛋白氧化变性起到了很好的抑制作用，但添加抗坏血酸钠漂洗却起到了相反的作用，主要原因是抗坏血酸的存在促进了蛋白质氧化的发生，这在与 wan 和 xiong[13]的研究中也有所体现，但

其具体机理尚未清晰。

2.2 经不同漂洗处理后冻藏对鲤鱼肌原纤维蛋白凝胶性能的影响

2.2.1 凝胶质构（TPA）的变化

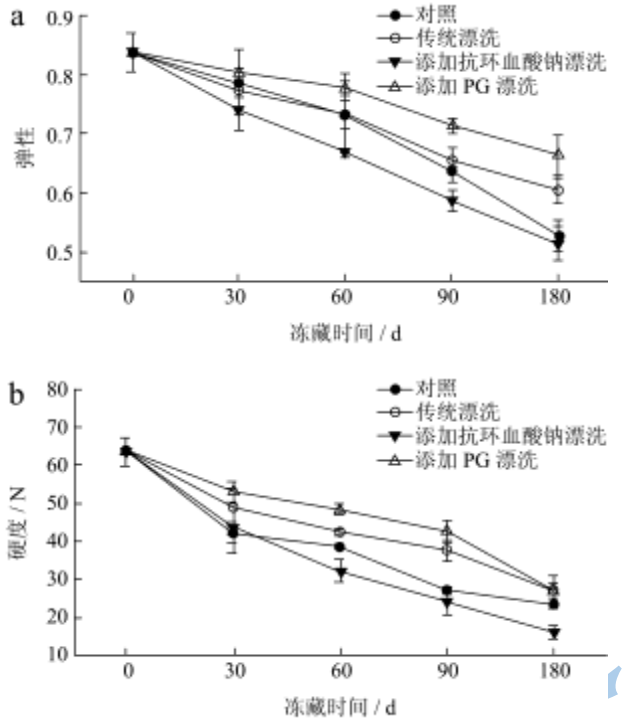


图 2 冻藏过程中鲤鱼肌原纤维蛋白凝胶弹性和硬度的变化

Fig.2 Changes of gel springness and hardness of common carp MP during frozen storage

图 2a 是经过不同漂洗处理的样品在冻藏过程中鲤鱼肌原纤维蛋白凝胶弹性的变化。新鲜鲤鱼肌原纤维蛋白凝胶的弹性为 0.94，经过 30、60、90 和 180 d 冻藏后，对照组的凝胶弹性下降了 6.41%、12.82%、23.91%和 36.96%；经过传统漂洗组样品的凝胶弹性下降了 7.92%、12.55%、21.76%和 27.82%；添加抗坏血酸钠漂洗的样品凝胶弹性下降了 11.42%、19.81%、29.92% 和 38.53%；添加 PG 漂洗的样品凝胶弹性下降了 3.91%、7.43%、14.91%和 20.74%（P<0.05）。图 2b 是经过不同漂洗处理的样品在冻藏过程中鲤鱼肌原纤维蛋白凝胶硬度的变化，其变化趋势与图 1-A 中乳化活性变化趋势相似。

通过以上分析，可以得出，添加 PG 漂洗的样品的凝胶特性，改变较少，说明 PG 能对蛋白起到一定得保护作用。

冻藏后鲤鱼肌原纤维蛋白凝胶特性的不断下降，主要是由于蛋白质氧化变性导致肌球蛋白之间的交联作用下降，不能形成良好的空间三维网状结构所致，蛋白凝胶形成能力下降。而添加抗氧化剂可以有效的抑制蛋白质氧化的发生，蛋白发生变性程度小，使蛋白凝胶的弹性和持水能力下降有所减缓。

2.2.2 凝胶持水性（WHC）和凝胶白度变化

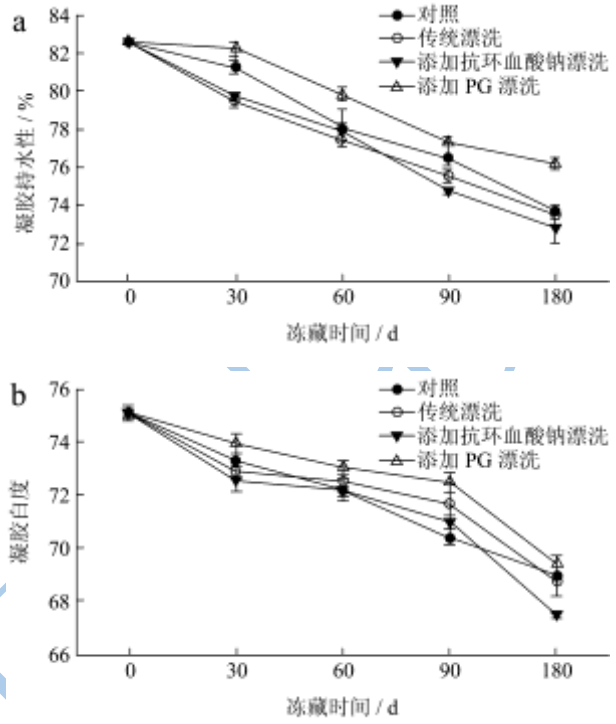


图 3 冻藏过程中鲤鱼肌原纤维蛋白凝胶保水性和凝胶白度的变化

Fig.3 Changes of gel water holding capability and gel whiteness of common carp MP during frozen storage

经过不同漂洗处理的样品在冻藏过程中鲤鱼肌原纤维蛋白凝胶保水性的变化如图 3a 所示。从图中可以看出，四种不同处理的鲤鱼肌原纤维蛋白凝胶保水性随着冻藏时间的延长而降低（P<0.05）。凝胶保水性与凝胶的结构（图 4）紧密相关，形成凝胶质量越好，其保水性就越高。

从图 3b 中可以看出，经过不同漂洗处理的鲤鱼肌原纤维蛋白凝胶白度值随着冻藏时间的延长而降低（P<0.05）。凝胶白度值的降低是由于在冻藏过程中肌肉蛋白质发生氧化引起的，也可能是由于脂肪氧化引起色素蛋白与肌肉蛋白交联，在肌原纤维蛋白提取过程由于冻结使蛋白质发生不同程度的变性，蛋白质分子间相互作用，色素蛋白去除不完全而保留在肌原纤维蛋白中引起的。

2.2.3 凝胶微观结构的变化

图 4 是不同漂洗条件、冻藏时间对鲤鱼肌原纤维蛋白凝胶微观结构的影响。新鲜肉提取蛋白形成的凝胶组织状态好，凝胶有均匀、细致、紧密、光滑的表面，整齐排列的层状结构，蛋白束平滑；冻藏后肌肉

蛋白质凝胶微观结构出现了不同程度的变化。

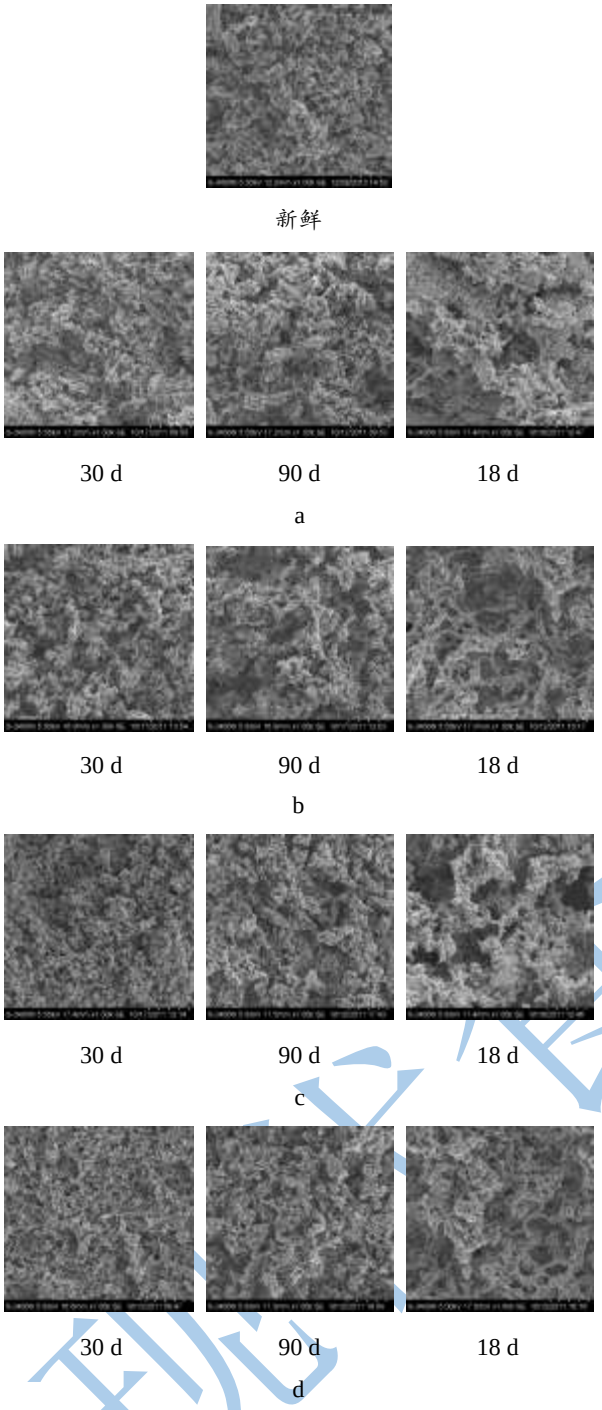


图4 不同漂洗条件、冻藏时间对鲤鱼肌原纤维蛋白凝胶微观结构的影响

Fig.4 Influence of different washing conditions and frozen storage times on the microstructure of *common carp* MP gels

注：放大倍数：1,000；a、b、c、d是分别代表对照，传统漂洗，添加抗坏血酸钠漂洗，添加PG漂洗。

图中a（对照，30 d）凝胶网状结构疏松、不均匀，蛋白质束有轻微的断裂；a（对照，90 d）凝胶网状结构较疏松、均匀度差，凝胶断裂严重；a（对照，180 d）凝胶网状结构凝断裂严重，出现塌陷和团状结构；b（普通漂洗，30 d）凝胶微观结构变得不均匀、有小的空洞；b（普通漂洗，90 d）凝胶断裂、疏松、出现大小不等的空洞；b（普通漂洗，180 d）凝胶微观结构出现更大的孔洞和更显明的断裂；c（添加抗坏血酸钠漂洗，30 d）出现了小的团块、结构疏松；c（添加抗坏血酸钠漂洗，90 d）组织疏松、结构粗糙、网格较大，保持水分的能力小，凝胶的功能特性也较差；c（添加抗坏血酸钠漂洗，180 d）凝胶网状结构凝胶断裂最严重，出现大小不等的空洞，凝胶三维网状结构破坏严重；d（添加PG漂洗，30 d）和空白相比除凝胶网结构略疏松外，没有其它的变化；d（添加PG漂洗，90 d）凝胶微观结构变得不均匀、有小的空洞；d（添加PG漂洗，180 d）出现孔洞、结构疏松。

从总体来看经过传统漂洗和添加抗坏血酸钠漂洗的样品凝胶结构破坏严重，添加PG漂洗的样品凝胶结构变化相对较小，尤其是在短时间冻藏（<90 d），说明添加PG漂洗可以在短时间内防止蛋白质氧化，从而起到保护蛋白质凝胶结构的作用。

2.3 凝胶流变特性的变化

经不同漂洗处理后冻藏的鲤鱼肌原纤维蛋白凝胶的流变学特性的变化如图5所示。新鲜鲤鱼肉提取的肌原纤维蛋白加热后 G'值缓慢增加直到46 ℃，随后快速下降到55 ℃，然后一直呈上升直至70 ℃第二次达到峰值。由图可以看出，随着冷冻时间的增加，所有样品的弹性模量G'都呈不断下降趋势。

经过不同漂洗处理的鲤鱼鱼糜经过不同时间冻藏的所有样品 G' 都有所降低。在整个温度范围内，样品 G' 数值随着贮藏时间的延长而减少，并且 G' 出现峰值的温度也有所下降。在同一冻藏时间，如冻藏90 d后，经过添加PG漂洗、普通漂洗、未漂洗、添加抗坏血酸钠漂洗的样品的第一个峰值从新鲜鱼肉的3666 Pa分别降至2598、2059、1897、1116 Pa，其对应的峰值温度也从46℃分别降至 45.5 ℃，44.8 ℃、43.2 ℃、42.4 ℃。

经过不同处理的样品的 G''的峰值变化趋势与 G'相似，即加热到 46 ℃，达到一个最大值，从 46 到54 ℃，G''急剧下降，直到80 ℃趋于稳定。整个加热过程中，G' 始终高于 G''，尤其是当温度>54 ℃，这表明一个更具弹性蛋白凝胶形成了。本实验中，所有蛋白试样的损耗模量 G'' 值都比对应的储能模量 G'值低，添加抗氧化剂漂洗的试样与未添加抗氧化剂漂洗的损耗模量G''有相似的图形。

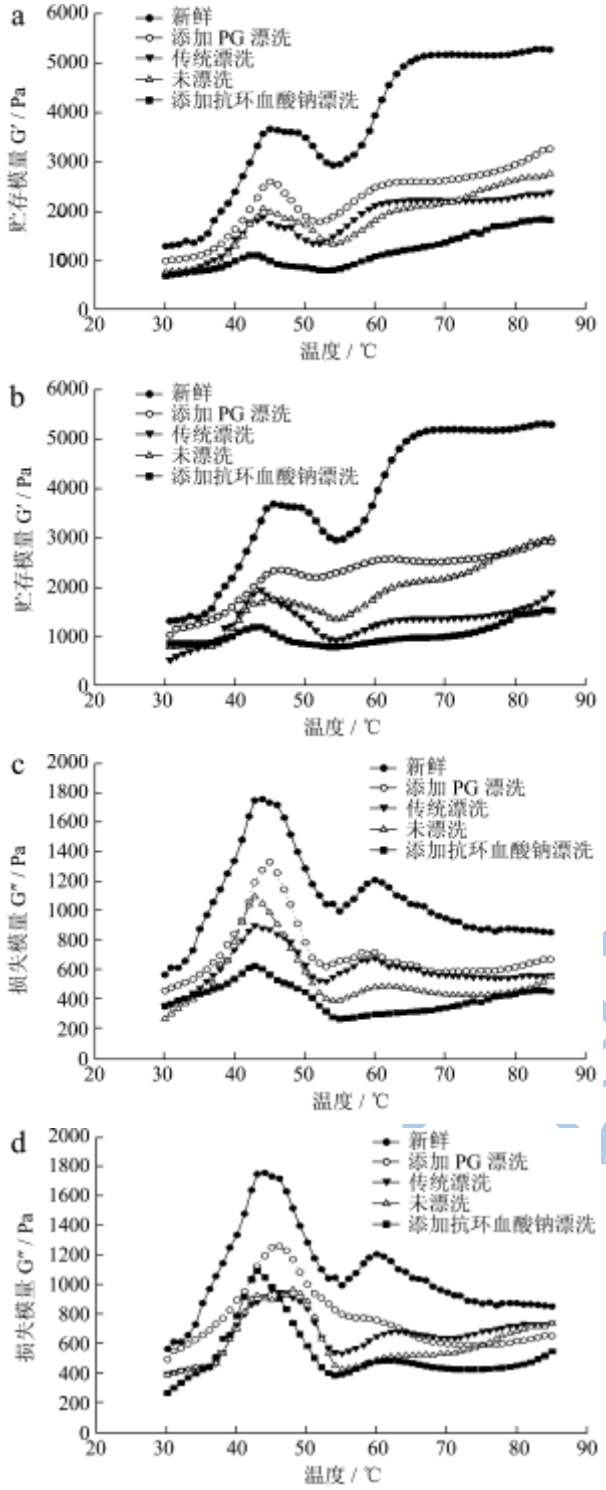


图 5 经不同漂洗处理后冻藏过程中鲤鱼肉肌原纤维蛋白流变学特性变化

Fig.5 Effect of different washing conditions and frozen storage time on the rheological properties of *common carp* MP

注：a-冻藏30 d；b-冻藏90 d。

从数据分析可以看出，不同冻藏时间下，经过不同漂洗处理的样品随着冻藏时间的延长其凝胶性呈逐渐下降趋势。但我们同时也发现，在相同的冻藏时间下，添加不同抗氧化漂洗组的趋势却表现出不同的形式，添加 PG 漂洗的样品的凝胶性优于其他组，而添加抗坏血酸钠漂洗的样品的凝胶性却变差，说明 PG 在冻藏过程中能起到抑制氧化的功效，而抗坏血酸钠反而起到了促进氧化的功效,这与前期实验结果一致。

3 结论

通过本实验的研究得出,经过不同漂洗处理的样品在冻藏过程中由蛋白质氧化引起了蛋白质功能特性的下降。但处理方式不同，下降程度也有所不同，添加抗坏血酸钠漂洗的样品功能特性破坏较严重，而添加 PG 漂洗的样品的功能特性优于对照组，说明 PG 可以在一定程度上抑制蛋白质的氧化，本试验首次将蛋白质氧化问题引入冷冻鱼糜生产过程，并首次提出在漂洗过程中添加抗氧化剂来抑制蛋白质的劣变，对冷冻鱼糜的实际生产具有一定的指导意义。

参考文献

[1] 段传胜,单杨.淡水鱼鱼糜加工的研究进展与关键性技术探讨[J].农产品加工(学刊),2007,7(15):52-58
DUAN Chuan-sheng, SHAN Yang. Advance in fresh- water surimi processing and discussion of critical technology [J]. Academic Periodical of Farm Products Processing, 2007, 7(15):52-58

[2] 王玉凤,李八方,张朝辉.漂洗对鲢鱼鱼糜凝胶和质构特性的影响[J].食品科学,2013,34(14):122-125
WANG Yu-feng, LI Ba-fang, ZHANG Chao-hui. Effect of rinsing on gel strength and texture properties of sliver carp surimi [J]. Food Science, 2013, 34(14): 122-125

[3] 李艳青,孔保华,夏秀芳.鱼糜凝胶形成机理及提高鱼糜凝胶特性的添加物研究新进展[J].食品科技,2012,(7):140-144
LI Yan-qing, KONG Bao-hua, XIA Xiu-fang. Gel formation mechanism of surimi and research progress on new additives of enhancing gel pproperties of surimi [J]. Food Science and Technology, 2012, (7): 140-144

[4] LUND MN, HEINONEN M, BARON CP, et al. Protein oxidation in muscle foods: A review [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2011, 55(1): 83-95

[5] EST VEZ M. Protein carbonyls in meat systems: A review [J]. Meat Science, 2011, 89(3): 259-279

[6] EYMARD S, BARON CP, JACOBSEN C. Oxidation of lipid and protein inhorse mackerel (*trachurus trachurus*) mince and washed minces during processing and storage [J]. Food Chemistry, 2009, 114(1): 57-65

[7] 黄莉,孔保华,李菁,等.氧化引起肉及肉制品品质劣变的机理及影响因素[J].食品科学,2011,32(9):319-323

HUANG Li，KONG Bao-hua，LI Jing，et al. Advances in studies of quality deterioration mechanism of meat and meat products caused by oxidation and influencing factors [J]. Food Science, 2011, 32(9): 319-323

[8] CHIN K B，GO M Y，XIONG Y L. Konjac Flour improved textural and water retention properties of transglutaminase-mediated, heat-induced porcine myofibrillar protein gel：effect of salt level and transglutaminase incubation [J]. Meat Science, 2009,81(3): 565-572

[9] LI Y, KONG B, XIA X, et al. Structural changes of the myofibrillar proteins in common carp muscle exposed to a hydroxyl radical-generating system [J]. Process Biochemistry, 2013, 48(5): 863-870

[10] CHEN H, KONG B, GUO Y, et al. The effectiveness of cryoprotectants in inhibiting multiple freeze-thaw-induced functional and rheological changes in the myofibrillar proteins of common carp (*Cyprinus carpio*) surimi[J]. Food Biophysics, 2013, 8(4): 302-310

[11] SALVADOR P, TOLDRÁ M, SAGUER E, et al. Microstructure-function relationships of heat-induced gels of porcine *haemoglobin* [J]. Food Hydrocolloids, 2009, 23(7): 1654-1659

[12] XIA X, KONG B, XIONG Y, et al. Decreased gelling and emulsifying properties of myofibrillarprotein from repeatedly frozen-thawed porcine *longissimus* muscle are due to protein denaturation and susceptibility to aggregation [J]. Meat Science, 2010, 85(3): 481-486

[13] WAN L, XIONG YL, DECKER EA. Inhibition of oxidation during washing improves the functionality of bovine cardiac myofibrillar protein [J]. Journal of agricultural and food chemistry, 1993, 41(12): 2267-2271

现代食品科技