高压物理学报
CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS

第31卷 第4期 高 压 物 理 学 报 Vol. 31, No. 4
2017年8月 CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS Aug., 2017

文章编号：1000-5773(2017)04-0494-11

# 超高压处理对冷藏鲈鱼片品质及组织结构变化的影响*

赵宏强[1]，吴金鑫[1]，张苑怡[1]，蓝蔚青[1]，刘书成[2]，孙晓红[1]，谢 晶[1]

(1. 上海海洋大学食品学院，上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心，上海 201306；
2. 广东海洋大学食品科技学院，广东湛江 524088)

**摘要**：为研究超高压处理对冷藏鲈鱼片品质及组织结构变化的影响，将新鲜鲈鱼片经不同超高压(200、250、300 MPa，保压时间9 min)处理后，置于4 ℃条件下贮藏。分别于0、4、8、11、13、15 d进行样品的理化指标(pH值、硬度、持水力、硫代巴比妥酸(TBA)值、挥发性盐基氮(TVB-N)值)和微生物指标(菌落总数)测定，并结合低场核磁共振技术表征其水分迁移状态，辅以外观及微观结构观察，进行指标间的相关性分析，以综合评价超高压处理对冷藏鲈鱼片品质及组织结构变化的影响。结果显示：随着贮藏时间的延长，样品的pH值呈先降后升的变化趋势，压力大小与pH值变化正相关，与硬度值、持水力负相关；超高压处理能抑制样品的TBA值、TVB-N值及菌落总数的上升，压力越高，抑制效果越显著。低场核磁共振技术结合持水力数据显示：超高压处理后鱼肉水分迁移变化明显；随着压力的增大，鱼肉样品表面呈乳白色，蒸煮效果显著。观察样品肌肉组织的微观结构得出，经超高压处理后，鱼体肌肉组织变得模糊，肌纤维结构紧致无序，其中300 MPa处理组样品呈明显凝胶状。超高压处理能抑制样品的脂肪氧化和微生物生长，但会对样品外观、色泽及持水力产生不利影响。进行指标间的相关性分析得到，TVB-N、TBA值和菌落总数能作为判断鲈鱼鲜度的重要指标。比较各组别间的结果差异性，以250 MPa、9 min超高压处理的综合评价效果相对较好，能使鲈鱼片的冷藏货架期至少延长4 d。

**关键词**：超高压；鲈鱼；冷藏；品质变化；结构变化
**中图分类号**：O521.9；S983 **文献标志码**：A
**doi**：10.11858/gywlxb.2017.04.019

## 1 引 言

鲈鱼(*Lateolabrax japonicus*)又名鲈板、花鲈、四肋鱼等，属鲈形目鲈科鲈属经济鱼类，主要分布于太平洋西部及中国沿海，其中又以黄海、渤海较多。其肉质鲜嫩，营养价值丰富，体内富含蛋白质、$V_A$、$V_B$、钙、镁、锌、硒等营养元素，具有补肝肾、益脾胃、化痰止咳的功效，深受广大消费者喜爱[1]。然而，由

* **收稿日期**：2017-04-03；**修回日期**：2017-04-17
**基金项目**：农业部海水鱼产业体系保鲜与贮运岗位科学家资助项目；广东海洋大学广东省水产品加工与安全重点实验室开放课题(GDPKLAPPS1504)；上海市科委工程中心能力提升项目(16DZ2280300)
**作者简介**：赵宏强(1990—)，男，硕士研究生，主要从事水产品保鲜技术研究. E-mail：374990969@qq.com
**通讯作者**：蓝蔚青(1977—)，男，博士，高级工程师，主要从事食品冷冻与冷藏研究. E-mail：wqlan@shou.edu.cn
谢 晶(1968—)，女，博士，教授，博士生导师，主要从事食品冷冻与冷藏研究.
E-mail：jxie@shou.edu.cn

© 2017 Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics 

于鲈鱼肉中营养物质和水分含量高,鱼体组织易受内源酶及微生物的影响,发生腐败变质。因此,极有必要采取相应处理技术延长其贮藏货架期。

食品的常用保鲜方式主要有物理法和化学法。物理法多利用升温处理食品,可能会对热敏类营养成分的保持产生不利影响,而利用光波或电磁波等产生的能量处理食品会造成大量资源消耗。化学法中使用的化学杀菌剂可能会造成化学物质残留,从而对人体健康带来负面作用[2]。超高压处理(High Pressure Processing,HPP)是食品的冷处理方式,将食品物料放入一个高压容器内,以水、油等液体作为媒介传递压力,在超高压(100～1 000 MPa)下保持一定时间,引起食品中非共价键(如氢键、离子键、疏水键等)的形成或破坏,导致食品中的微生物菌体死亡及蛋白质变性等,从而起到杀菌钝酶、改善食品品质和延长货架期的目的[3]。近年来,国内外也有部分研究学者将 HPP 用于水产品的杀菌保鲜中。Cruz-Romero 等[4]研究发现,500 MPa 处理后,能使海鲈鱼肉中的半胱氨酸蛋白酶活性提高,300 MPa 处理后样品中组织蛋白酶活性减小。Karim 等[5]对鳕鱼分别在 200、250 和 300 MPa 下处理 1 min 和 3 min 后发现,处理组样品的挥发性盐基氮(Total Volatile Basic Nitrogen,TVB-N)值明显低于对照组。杨茜等[6]研究得出,带鱼段经 290 MPa 处理 9 min 后,其 TVB-N 值低于对照组,且能使带鱼段的冷藏货架期达 12 d。Erkan 等[7]研究发现,3 ℃、250 MPa 处理 5 min 和 25 ℃、250 MPa 处理 10 min,均能使鲑鱼在 2 ℃条件下的货架期达 8 周,而对照组仅为 6 周。

本研究对新鲜鲈鱼片进行超高压处理,并在 4 ℃条件下冷藏,通过测试其理化指标,包括 pH 值、硬度、持水力(Water Holding Capacity,WHC)、硫代巴比妥酸值(Thiobarbituric Acid,TBA)值、TVB-N 值,及微生物指标菌落总数(Total Viable Count,TVC),并结合低场核磁共振(Low Field-Nuclear Magnetic Resonance,LF-NMR)技术,辅以外观及微观结构观察,进行指标间的相关性分析,以综合评价超高压处理对冷藏鲈鱼片品质及组织结构变化的影响。

## 2　材料与设备

### 2.1　实验原料

鲜活鲈鱼购于上海市浦东新区农工商超市,体重(500±50)g,体长(28±2)cm。

### 2.2　药品与试剂

生理盐水、琼脂培养基、轻质氧化镁、0.09 mol/L HCl 溶液、溴甲酚绿-甲基红混合指示剂、40 g/L 硼酸溶液、200 g/L 三氯乙酸(Trichloroacetic Acid,TCA)、硫代巴比妥酸、2.5%(体积分数)戊二醛溶液、KCl 试剂、无水乙醇、乙酸异戊酯等。

### 2.3　主要仪器设备

HPP.L2-600/2 型超高压设备(天津华泰森淼生物工程技术有限公司)、Hitachi S-3400NⅡ型扫描电镜(上海日立高新技术有限公司)、AUW320 型分析天平(日本岛津公司)、TGL-16M 型台式高速冷冻离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司)、722 型可见分光光度计(上海舜宇恒平科学仪器有限公司)、TA.XT Plus 型质构仪(英国 Stable Micro System 公司)、FJ200-S 型数显高速均质机(杭州齐威仪器有限公司)、SW-CJ-1D 型单人净化工作台(苏州净化设备有限公司)、Kjeltec2300 型凯氏定氮仪(丹麦 FOSS 公司)、LDZM-40KCS-Ⅲ型立式压力蒸汽灭菌器(上海申安医疗器械厂)、DNP-9002BS-Ⅲ型电热恒温培养箱(上海新苗医疗器械制造有限公司)、HH-6 型数显恒温水浴锅(国华电器有限公司)、JX-05 型拍打式无菌均质器(上海净信实业发展有限公司)、DZ-400-2D 型真空包装机 (温州市鹿城区黄龙华能机械厂)、MesoMR23-060H-1 型低场核磁共振仪(上海纽迈电子科技有限公司)等。

## 3　实验方法

### 3.1　原料处理

将鲜活鲈鱼运回实验室,放入盛满碎冰的泡沫箱中,使其窒息死亡,然后经去头、去尾、去内脏和去

皮处理,用蒸馏水洗净沥干。将预处理好的鲈鱼片随机装入真空包装袋内,进行真空包装,抽气速率为20 $m^3$/h,抽气时间10 s,电热封口时间1.5 s。从样品猝死到前处理结束,全过程在15 min内完成。将包装完成的样品分为4组,参考Truong等[8]与杨茜等[6]的方法,超高压处理组的压力分别采用200、250和300 MPa,以未处理样品为对照组(0.1 MPa),保压时间均为9 min。以水为媒介,升压速率为8 MPa/s,卸压处理10 s完成。将不同超高压处理后的样品分组放入冰箱中4 ℃贮藏,分别于0、4、8、11、13、15 d进行各项指标测定。

## 3.2 理化指标

### 3.2.1 pH值

参考Ruiz-Capillas等[9]的方法,称取5 g鲈鱼鱼肉,剁成肉糜,加入45 mL蒸馏水搅拌后静置1 h,用pH测定仪测定其pH值。将探头插入液面以下,待数值稳定后读数,每个样品做3次平行测试。

### 3.2.2 硬 度

参考李念文等[10]的方法,将鱼肉切成10 mm×10 mm×10 mm的方块。测试条件为:平底柱形探头P/6;测前速率3 mm/s,测试速率1 mm/s,测后速率1 mm/s,压缩程度50%,停留间隔5 s;负重探头类型为Auto-5 g;数据收集率为200。将样品平放于测试台,对硬度值进行6次平行测定。

### 3.2.3 持水力

参照李念文等[10]的方法,取3 g样品放在滤纸中进行包裹,置于离心管中,在3 000 r/min转速下离心10 min,沥干表面的水分称重,重复3次,取平均值。

$$w_{WHC}=[1-(M-m)/M]\times 100\% \tag{1}$$

式中:$w_{WHC}$代表持水力,$M$为样品初始质量(g),$m$为离心后样品质量(g)。

### 3.2.4 硫代巴比妥酸值

参考Salih等[11]的方法,称取鱼肉5.00 g加入50 mL离心管,随后加入25 mL 200 g/L的三氯乙酸,均质1 min,静置1 h后放入冷冻离心机中以8 690 r/min离心10 min,过滤,用蒸馏水定容至50 mL,取滤液5 mL加入0.02 mol/L的TBA溶液5 mL混匀,在沸水浴中煮沸20 min进行显色反应,对冷却后的溶液用分光光度计测定其在532 nm波长处的吸光度($A$)值。TBA值以丙二醛(MDA)的质量分数表示,单位为mg/kg。

### 3.2.5 挥发性盐基氮值

参照国标GB 5009.228—2016[12]进行鲈鱼肉TVB-N值的测定。

## 3.3 细菌总数

参照GB 4789.2—2010[13]进行样品菌落总数的测定。

## 3.4 低场核磁共振分析

### 3.4.1 弛豫时间测定

核磁共振横向弛豫时间$T_2$采用CPMG序列(Carr-Purcell-Meiboom-Gill sequence)测定。质子共振频率为21 MHz,测定温度为32 ℃[14]。参数如下:采样频率(SW)为100 kHz,模拟增益(RG)为120,90°脉冲时间($P_1$)为18.00 μs,数字增益(DRG1)为6,采样点数(TD)为400 004,前置放大增益(PRG)为1,重复采样间隔时间(TW)取2 000 ms,累加次数(NS)为4,180°脉冲时间(P2)为34.00 μs,回波时间(TE)为0.500 ms,回波个数(NECH)为8 000。得到的图像为指数衰减图形。取10 g样品,为防止水分蒸发,用无核磁弛豫信号的保鲜膜封口后,再放入∅60 mm的核磁管中,用分析仪对每个样品进行至少3次重复分析。

### 3.4.2 核磁共振成像

参考Liu等[15]的方法,稍加修改,采用核磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging,MRI)技术测定鱼肉的质子密度图谱。将样品包上保鲜膜后直接放入∅60 mm核磁管中,随后放入MR-60核磁共振成像仪中做成像分析。通过MSE成像序列得到凝胶的质子密度成像,测定条件如下:重复等待时间(TR)为500 ms,回波时间(TE)为18.2 ms。使用拉莫尔定律$\nu=\gamma B_0/2\pi$(其中:$\nu$为进动频率,$\gamma$为磁旋

比,$B_0$ 为磁场强度)选择成像层面,对信噪比及图像清晰度进行调节,得到的成像图谱由 8 次扫描重复累加而成。质子密度图由纽迈公司提供的软件统一映射、伪彩。

### 3.5　微观结构分析

参考马海建等[16]的方法,略做改动。将鲈鱼鱼肉用刀片切成 3.0 mm×3.0 mm×1.5 mm 大小的颗粒,加入 2.5%的戊二醛溶液,4 ℃下固定 24 h,倾去固定液,用 0.1 mol/L、pH 值为 7.3 的磷酸缓冲液漂洗样品 3 次,每次 15 min;然后用体积分数 30%、50%、70%、80%、90%、95%和 100%的乙醇溶液对样品进行梯度洗脱,再用乙酸异戊酯置换乙醇;最后将处理好的样品进行冷冻干燥,在离子溅射仪中喷金后进行扫描电镜观察,加速电压为 20 kV。

### 3.6　数据处理

实验数据均取 3 次平行实验的平均值,采用软件 Origin Pro 8.5 绘制曲线,数据间差异通过统计软件 SPSS19.0 中的 Duncan 新复极差法进行方差分析和多重比较,结果以平均值±标准偏差表示。

## 4　结果与分析

### 4.1　pH 值变化

水产品死后会经历初期的生理生化变化、死后僵硬、解僵、自溶和腐败的变化过程。僵直期间,鱼体内的糖原降解,产生大量乳酸等酸性物质,使鱼体内酸性物质增多,pH 值下降[17];僵直期结束后,鱼肉在酶和微生物的作用下,蛋白质、氨基酸及含氮物质分解成氨类、胺等碱性物质,使其 pH 值升高,从而 pH 值呈现先降后升的变化过程[18]。

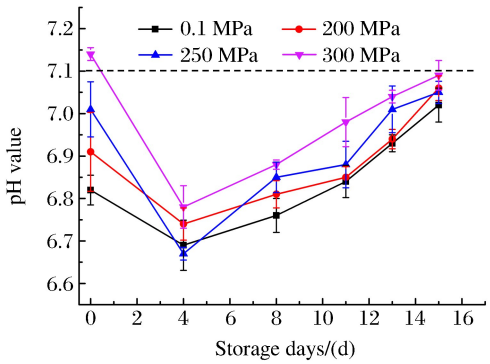



图 1　超高压处理对冷藏鲈鱼片 pH 值变化的影响

Fig. 1　Effect of HPP on pH value in *Lateolabrax japonicas* fillets during cold storage

由图 1 可见,在贮藏初期,超高压处理组样品的 pH 值较对照组有所升高,且随着压力的增大,pH 值呈上升趋势。这是由于超高压作用使鲈鱼中的某些蛋白质发生变性,引起肌肉细胞的部分破裂,细胞内容物外流,导致一些碱性氨基酸基团暴露,并与其中的酸性基团中和,导致 pH 值升高[19]。超高压影响贮藏期间鲈鱼片 pH 值的变化过程与徐永霞等[18]的研究结果类似。

### 4.2　硬度分析

硬度反映鱼肉保持形状的内部结合力。超高压处理后冷藏鲈鱼片的硬度变化见表 1,其中:同一列中,不同小写字母上标表示差异显著($P<0.05$);同一行中,不同大写字母上标表示差异显著($P<0.05$)。

**表 1　超高压处理对冷藏鲈鱼片硬度变化的影响**

**Table 1　Effect of HPP on hardness of *Lateolabrax japonicas* fillets during cold storage**

| Storage days/(d) | Hardness/(N) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0.1 MPa | 200 MPa HPP | 250 MPa HPP | 300 MPa HPP |
| 0 | $12.31\pm0.49^{aC}$ | $16.15\pm0.68^{aB}$ | $16.93\pm0.70^{aAB}$ | $18.18\pm0.96^{aA}$ |
| 4 | $11.19\pm1.21^{aB}$ | $12.68\pm1.33^{bcB}$ | $15.31\pm0.71^{bA}$ | $16.08\pm0.53^{bA}$ |
| 8 | $11.27\pm2.41^{aB}$ | $13.79\pm1.57^{bAB}$ | $15.02\pm0.78^{bA}$ | $16.52\pm1.20^{bA}$ |
| 11 | $10.34\pm0.73^{abC}$ | $11.37\pm0.73^{cBC}$ | $12.07\pm0.71^{cB}$ | $13.45\pm0.77^{cA}$ |
| 13 | $8.64\pm0.50^{bA}$ | $8.74\pm0.93^{dA}$ | $9.10\pm1.10^{dA}$ | $10.17\pm0.77^{dA}$ |
| 15 | $6.64\pm0.07^{bAB}$ | $7.64\pm0.90^{dA}$ | $6.13\pm0.92^{eB}$ | $7.69\pm0.19^{eA}$ |

由表 1 可以看出,超高压处理后,冷藏鲈鱼肉的硬度值呈上升趋势。对照组样品贮藏初期的硬度值

为(12.31±0.49)N,与 300 MPa 处理组样品差异显著($P<0.05$)。200 MPa 与 250 MPa 处理组样品间的硬度差异不显著($P>0.05$),与 Ramirez-Suarez 等[20]的研究结果一致。这可能由于超高压处理促进分子间二硫键的形成,导致肌球蛋白分子发生聚集变性。随着货架期的延长,对照组和超高压处理组样品的硬度值均出现下降,这是由于贮藏时间延长会使鱼肉组织内的腐败菌大量繁殖,造成肌肉组织中的蛋白质变性,结构松散,从而导致鱼肉硬度降低,发生品质劣变。

### 4.3 持水力变化

持水力表示在一定外力作用下,样品束缚自身或外加水分的能力[21]。水分是肌肉中的主要成分,水与大分子物质的相互作用决定持水力的大小,高压能影响肌肉中部分蛋白质的分子结构,从而改变蛋白质分子持留水分的能力[22]。

由图 2 可知,在贮藏期间,250 MPa 和 300 MPa 处理组样品的持水力先升后降,且超高压处理组样品的持水力均低于对照组。这可能由于新鲜鲈鱼肌肉组织均匀,肌原纤维排列紧密,而超高压处理造成鲈鱼肌肉中部分蛋白质变性及肌原纤维结构变化,使持水力下降,与 Lakshmanan 等[23]超高压处理后冷藏鲑鱼的持水力变化结果相似。压力越大,鲈鱼鱼肉的持水力下降幅度越明显。雒莎莎[24]研究超高压处理鳙鱼发现,超高压能使肌原纤维间的空隙变大,这可能也是导致其持水力下降的原因之一。

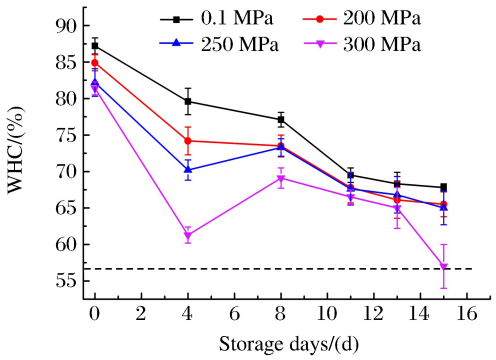



图 2 超高压处理对冷藏鲈鱼片持水力变化的影响

Fig. 2 Effect of HPP on WHC of *Lateolabrax japonicas* fillets during cold storage

### 4.4 TBA 值变化

鱼肉在适当条件下会发生氧化酸败,不饱和脂肪酸经过氧化得到的降解产物丙二醛能与 TBA 反应生成稳定的粉红色化合物[6]。可根据吸光度的大小判断鱼肉脂肪的氧化程度,TBA 值越大,表明水产品脂肪的氧化程度越严重。因此,TBA 值可用于反映水产品中脂肪的氧化酸败程度,通常可作为表征水产品新鲜度的重要指标之一。表 2 为不同处理方式的冷藏鲈鱼片在贮藏期间 TBA 值的变化情况,其中:同一列中,不同小写字母上标表示差异显著($P<0.05$);同一行中,不同大写字母上标表示差异显著($P<0.05$)。

**表 2 超高压处理对冷藏鲈鱼片 TBA 值变化的影响**

**Table 2 Effect of HPP on TBA value of *Lateolabrax japonicas* fillets during cold storage**

| Storage days/(d) | TBA value/(mg/kg) | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0.1 MPa | 200 MPa HPP | 250 MPa HPP | 300 MPa HPP |
| 0 | $0.37\pm0.03^{dA}$ | $0.43\pm0.10^{cA}$ | $0.43\pm0.04^{bA}$ | $0.46\pm0.15^{bcA}$ |
| 4 | $0.59\pm0.02^{cdA}$ | $0.51\pm0.03^{cA}$ | $0.68\pm0.04^{bA}$ | $0.25\pm0.09^{cB}$ |
| 8 | $0.78\pm0.06^{bcA}$ | $0.62\pm0.06^{bcA}$ | $0.62\pm0.03^{bA}$ | $0.40\pm0.05^{bcB}$ |
| 11 | $0.81\pm0.02^{bcA}$ | $0.77\pm0.07^{bA}$ | $0.61\pm0.09^{bA}$ | $0.63\pm0.05^{abA}$ |
| 13 | $1.01\pm0.06^{bA}$ | $0.82\pm0.12^{bA}$ | $0.80\pm0.23^{bA}$ | $0.79\pm0.03^{aA}$ |
| 15 | $2.10\pm0.22^{aA}$ | $1.29\pm0.05^{aB}$ | $1.24\pm0.14^{aBC}$ | $0.83\pm0.03^{aC}$ |

由表 2 可知,贮藏初期,各组别的 TBA 值差异性不显著($P>0.05$)。这可能由于在短时间内压力未对鲈鱼肌肉细胞中的血红蛋白造成破坏,使其释放金属离子,故自动氧化反应不明显[25]。随着货架期的延长,对照组样品的 TBA 值显著升高($P<0.05$),说明其脂肪氧化较严重。而超高压处理组鱼样的 TBA 值上升趋势明显缓于对照组,300 MPa 处理组样品尤其显著,由此可知超高压处理能较好地延缓鲈鱼片脂肪的氧化速度,延长鲈鱼的冷藏货架期。Senturk 等[26]在超高压对大西洋鲭鱼影响的研究中发现,超高压处理能有效抑制鱼肉在贮藏期间 TBA 值的增长速率。随着贮藏时间的延长,压力越高,抑制作用越明显。

### 4.5　TVB-N 值变化

挥发性盐基氮(TVB-N)是贮藏期间鱼肉中蛋白质等含氮物质在细菌和酶的作用下,分解产生氨类和胺等挥发性碱类含氮物质,是评价水产品新鲜度的重要指标。鲈鱼肉的 TVB-N 值小于 13 mg/100 g 为一级鲜度,TVB-N 值大于 30 mg/100 g 则为已腐败[27]。

由图 3 可知,在贮藏前期,各组样品的 TVB-N 值增长缓慢,均在一级鲜度范围内。这可能由于鲈鱼鱼肉中的微生物还未适应环境,增长速度不明显。随着贮藏时间的延长,鱼肉处于自溶阶段,鱼肉中的微生物开始大量繁殖,产生胞外蛋白酶,氨基酸的脱酸脱氨反应造成胺类物质的大量产生,TVB-N 值明显上升[28]。其中,对照组样品的 TVB-N 值在 11 d 时达(28.27±2.37)mg/100 g,已接近腐败,而超高压处理组样品的 TVB-N 值在 15 d 时仍未达限值,说明超高压处理能明显延缓样品 TVB-N 值的升高,该结果与 Bindu 等[29]的研究结果一致。样品经超高压处理后,能在一定程度上杀灭部分微生物,且使部分酶失去活性,适当阻止了含氮物质的产生,抑制挥发性盐基氮含量的升高[30]。

### 4.6　细菌总数变化

菌落总数(TVC)的变化可反映蛋白质和氨基酸的分解代谢情况,因此菌落总数是衡量鲈鱼腐败程度的重要参数。Al-Daqal 等[31]提出水产品可食用的菌落总数上限为 6.0 lg(CFU/g)。

由图 4 可知,贮藏初期,对照组样品的菌落总数高于超高压处理组,且差异显著($P<0.05$)。压力越高,抑菌效果越明显。这可能由于超高压环境下,菌体细胞膜受到损伤,致使内容物外漏,结构被破坏,氢键、疏水键和离子键等非共价键发生改变,产生蛋白质压力凝固,酶活性被抑制[32]。随着贮藏时间的延长,样品的菌落总数呈递增趋势。对照组样品的菌落总数在 11 d 时已达(6.21±0.04)lg(CFU/g),鱼样散发出腐败气味,表明已进入腐败阶段;而 300 MPa 超高压处理组样品的菌落总数在 15 d 时才达到(6.08±0.01)lg(CFU/g),刚进入腐败。结果表明,超高压处理能使冷藏鲈鱼片的货架期得到相应延长,且压力越高,作用效果越好[33]。

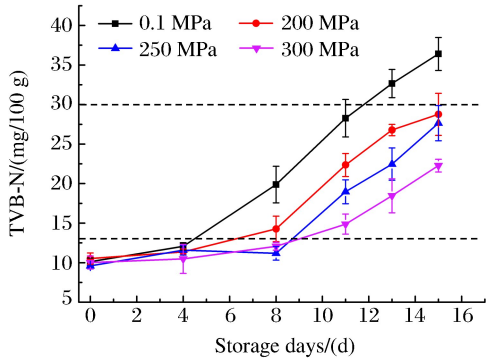



图 3　超高压处理对冷藏鲈鱼片 TVB-N 值变化的影响

Fig. 3　Effect of HPP on TVB-N value of *Lateolabrax japonicas* fillets during cold storage

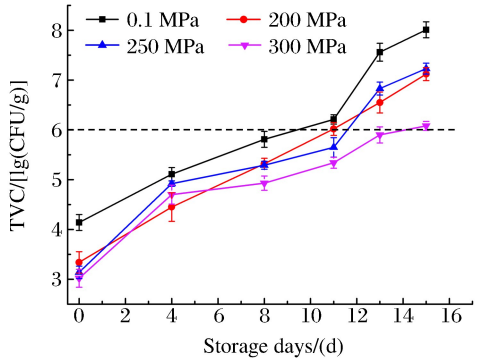



图 4　超高压处理对冷藏鲈鱼片 TVC 值变化的影响

Fig. 4　Effect of HPP on TVC value of *Lateolabrax japonicas* fillets during cold storage

### 4.7　核磁共振分析结果

#### 4.7.1　弛豫时间特性

低场核磁共振分析多以氢核($^1$H)为研究对象,其中$^1$H 核以非辐射的方式从高能态转变为低能态的过程称为弛豫,在肉及肉制品中弛豫时间多用 H 质子的横向弛豫时间 $T_2$ 表示。$T_2$ 分布可表明肉中存在多个水分群。$T_2$ 越短,表明水与底物结合越紧密;$T_2$ 越长,表明水分越自由。因此,弛豫时间 $T_2$ 可间接表明水分的自由度。其中:$T_{2b}$(小于 1 ms)代表大分子结构中存在的水,$T_{21}$(1～10 ms)代表与大分子结合的水,$T_{22}$(30～100 ms)代表不可移动水,$T_{23}$(大于 100 ms)代表自由水[34]。不同超高压处理后鲈鱼鱼肉组织中水分子的弛豫特性如图 5 所示。

由图 5 可知:0～10 ms 内所有样品组的峰值无显著性差异($P>0.05$),可能由于本实验的超高压条

件对鲈鱼肌肉组织内部的结合水影响不明显；250 MPa处理组样品的弛豫时间明显右移，可能由于超高压处理使鲈鱼片肌肉组织结构受到破坏，肌肉纤维保水性降低，导致样品组织中的结合水向自由水转变，持水能力下降。

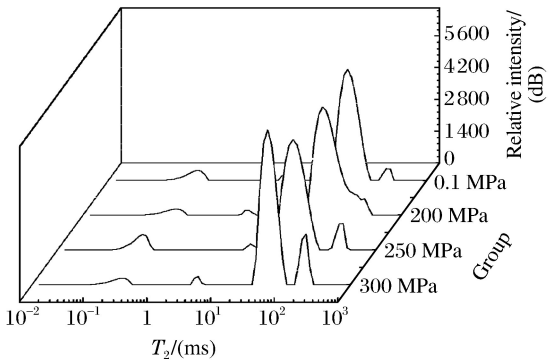


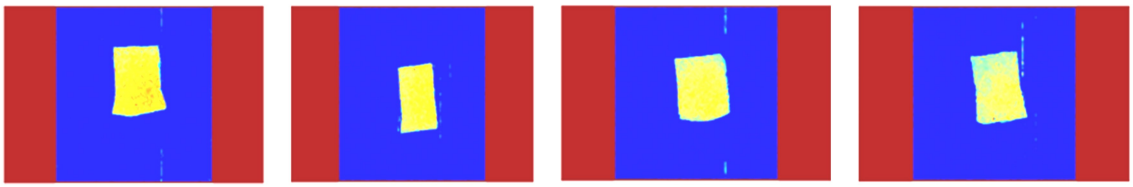

图 5 超高压处理对冷藏鲈鱼片弛豫时间($T_2$)的影响

Fig. 5 Effect of HPP for $T_2$ relaxation time in *Lateolabrax japonicas* fillets during cold storage

#### 4.7.2 核磁共振成像

一般情况下，MRI 图像中的亮度越强(伪彩图越趋红色)，说明该部位的水质子信号越强，水分含量就越高。

由图 6 可知，随着压力的增大，质子密度加权像的亮度由高到低依次减弱，说明鲈鱼鱼肉的自由水增多。从李侠等[35]的研究可知，蓝色程度越高，其自由水含量越高。由样品 MRI 观察结果中的蓝色程度得出，随着压力的增大，鱼肉的蓝色范围逐渐增大，说明自由水变多，与持水力的研究结果相符。



(a) 0.1 MPa (b) 200 MPa (c) 250 MPa (d) 300 MPa

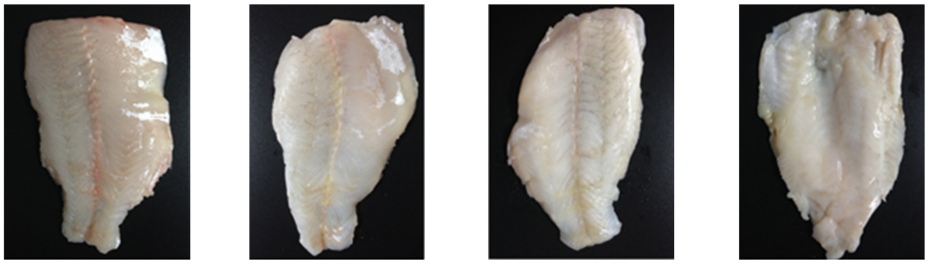
图 6 超高压处理后冷藏鲈鱼片的核磁共振伪彩图(0 d)

Fig. 6 Effect of HPP on pseudo color of $^{1}$H MRI of *Lateolabrax japonicas* fillets (0 d)

### 4.8 组织结构变化

#### 4.8.1 外观变化

外观是消费者接受水产品的直观反映，其状态差异直接决定消费者的购买意愿。不同超高压处理对冷藏鲈鱼片(贮藏初期)外观的影响如图 7 所示，可见，超高压处理会使鲈鱼肉呈乳白色。压力越大，鱼肉体表的蒸煮效果愈明显，从而给消费者进行产品选择带来不良影响。Truong 等[8]对澳洲肺鱼鱼肉进行超高压处理，结果发现压力越大，鱼肉的蒸煮效果也越明显。



(a) 0.1 MPa (b) 200 MPa (c) 250 MPa (d) 300 MPa

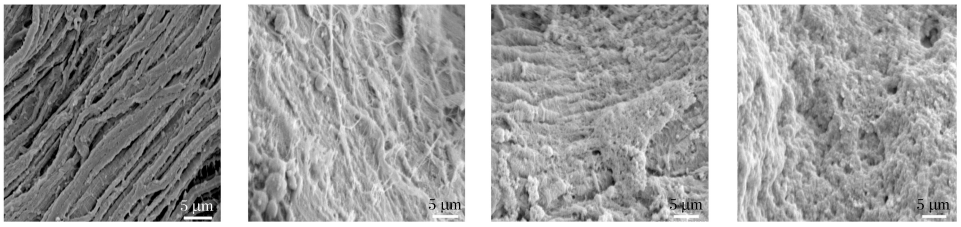
图 7 超高压处理对冷藏鲈鱼片外观的影响(0 d)

Fig. 7 Effect of HPP on appearance of *Lateolabrax japonicas* fillets during cold storage (0 d)

#### 4.8.2 微观结构观察

鲈鱼鱼肉经不同超高压处理后，在 0 d 时微观组织结构的变化如图 8 所示。由图 8 可见，对照组样品的肌肉组织线条纹理紧凑清晰、排列有序，而经超高压处理后的样品表面纹理变得模糊，表面肌纤维结构紧致无序。200 MPa 处理组样品开始出现凝胶化现象，处理压力升至 300 MPa 时更明显，与

Cheftel等[36]研究的蛋白质变化特征相近。杨华等[37]在对养殖大黄鱼肌纤维结构的研究中发现,300 MPa压力处理会使大黄鱼的鱼肉组织呈网状结构。这是由于超高压使鱼肉组织蛋白变性,蛋白质的三维及四维结构改变,使鱼肉组织蛋白凝胶化。从超高压处理后鲈鱼片的微观结构改变可看出,压力增大会使鲈鱼肌肉的性质发生改变,从而影响其外观质地。




(a) 0.1 MPa　(b) 200 MPa　(c) 250 MPa　(d) 300 MPa

图 8　超高压处理对冷藏鲈鱼片微观结构变化的影响(0 d,放大率:6 000)

Fig. 8　Effect of HPP on microstructure of *Lateolabrax japonicas* fillets during cold storage (0 d, magnification: 6 000)

## 4.9　相关性分析

样品各指标的相关性分析如表 3 所示,其中:上标"*"表示显著性水平 $P<0.05$,上标"**"表示表示显著性水平 $P<0.01$。

**表 3　样品贮藏期间各指标相关性的分析**

**Table 3　Correlation analysis among parameters of each group during cold storage**

| Group | Variables | TVB-N | pH | TBA | WHC | TVC | Hardness |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.1 MPa | TVB-N | 1.000 | 0.822** | 0.806** | 0.935** | 0.951** | −0.579* |
| | pH | | 1.000 | 0.784** | −0.652** | 0.765** | −0.280 |
| | TBA | | | 1.000 | −0.691** | 0.829** | −0.701** |
| | WHC | | | | 1.000 | −0.921** | 0.682** |
| | TVC | | | | | 1.000 | −0.672** |
| | Hardness | | | | | | 1.000 |
| 200 MPa | TVB-N | 1.000 | 0.667** | 0.834** | −0.835** | 0.927** | −0.777** |
| | pH | | 1.000 | 0.654** | −0.294** | 0.522** | −0.699** |
| | TBA | | | 1.000 | −0.729** | 0.811** | −0.717** |
| | WHC | | | | 1.000 | −0.924** | 0.627** |
| | TVC | | | | | 1.000 | −0.748** |
| | Hardness | | | | | | 1.000 |
| 250 MPa | TVB-N | 1.000 | 0.546* | 0.645** | −0.835** | 0.880** | −0.390** |
| | pH | | 1.000 | 0.232** | 0.017 | 0.251 | −0.468 |
| | TBA | | | 1.000 | −0.627** | 0.718** | −0.431 |
| | WHC | | | | 1.000 | −0.907** | −0.109 |
| | TVC | | | | | 1.000 | −0.355 |
| | Hardness | | | | | | 1.000 |
| 300 MPa | TVB-N | 1.000 | 0.428 | 0.758** | −0.600** | 0.793** | −0.522* |
| | pH | | 1.000 | 0.581* | 0.340 | 0.112 | −0.512* |
| | TBA | | | 1.000 | −0.331 | 0.588* | −0.391 |
| | WHC | | | | 1.000 | −0.848** | 0.267 |
| | TVC | | | | | 1.000 | −0.125 |
| | Hardness | | | | | | 1.000 |

由表3得出:对照组样品指标中,除pH值与硬度间差异不显著外,其余指标之间均差异显著($P<0.05$);200 MPa处理组样品中,所有指标均差异极显著($P<0.01$);250 MPa处理组样品中,硬度与TVB-N值差异极显著($P<0.01$),但与其它指标差异不显著,同时pH值与持水力、菌落总数差异不显著;300 MPa处理组样品中,pH值与TVB-N值、持水力、菌落总数差异不显著($P>0.05$),硬度与TBA值、持水力、菌落总数差异不显著($P>0.05$)。随着货架期的延长:各处理组样品的TVB-N值、pH值、TBA值和菌落总数均呈递增趋势,为显著正相关;持水力和硬度值均呈下降趋势,为显著负相关。由此可知,TVB-N、TBA值和菌落总数可作为评价超高压处理后鲈鱼片新鲜度的重要指标。

## 5 结 论

在保压时间为9 min的条件下,对鲈鱼片进行压力分别为200、250和300 MPa的超高压处理,并予以冷藏,通过理化、微生物指标、低场核磁共振分析及组织结构观察得出:随着压力的增大,冷藏鲈鱼片在贮藏期间的pH值、TBA、TVB-N值和菌落总数均呈上升趋势,而持水力和硬度值随之下降。由低场核磁共振结合持水力分析得到,超高压处理后鱼肉的水分迁移明显,压力增大促使结合水向自由水迁移;压力增大会使样品表面呈乳白色,且压力愈大蒸煮效果愈严重;扫描电镜观察结果显示,超高压处理使样品肌肉组织纹理变得模糊,肌纤维结构紧致无序,其中300 MPa处理组样品呈明显凝胶状,250 MPa处理对样品影响较小。因此,综合考虑选取250 MPa、9 min进行鲈鱼片样品的超高压处理最合适。

## References:


[1] 邓锦峰,王安利,周初霞,等. 鲈鱼的营养研究进展 [J]. 饲料工业,2006,27(10):59-60.

[2] 许世闯,徐宝才,奚秀秀,等. 超高压技术及其在食品中的应用进展 [J]. 河南工业大学学报(自然科学版),2016,37(5):111-116.
XU S C,XU B C,XI X X,et al. Ultrahigh pressure technology and its application progress in food [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition),2016,37(5):111-116.

[3] 夏远景,薄纯智,张胜勇,等. 超高压食品处理技术 [J]. 食品与药品,2006,8(2A):62-67.
XIA Y J,BO C Z,ZHANG S Y,et al. High pressure technology for food processing [J]. Food and Drug,2006,8(2A):62-67.

[4] CRUZ-ROMERO M,KELLY A L,KERRY J P. Effects of high-pressure and heat treatments on physical and biochemical characteristics of oysters (*Crassostrea gigas*) [J]. Innovat Food Sci Emerg Tech,2007,8(1):30-38.

[5] KARIM N U,KENNEDY T,LINTON M,et al. Effect of high pressure processing on the quality of herring (*Clupea harengus*) and haddock (*Melanogrammus aeglefinus*) stored on ice [J]. Food Control,2011,22:476-484.

[6] 杨 茜,谢 晶. 超高压对冷藏带鱼段的保鲜效果 [J]. 食品与发酵工业,2015,41(6):200-206.

[7] ERKAN N,ÜRETENER G,ALPAS H,et al. The effect of different high pressure conditions on the quality and shelf life of cold-smoked fish [J]. Innovat Food Sci Emerg Tech,2011,12(2):104-110.

[8] TRUONG B Q,BUCKOW R,NGUYEN M H,et al. High pressure processing of barramundi (*Lates calcarifer*) muscle before freezing:the effects on selected physicochemical properties during frozen storage [J]. J Food Eng,2016,169:72-78.

[9] RUIZ-CAPILLAS C,MORAL A. Sensory and biochemical aspects of quality of whole bigeye tuna (*Thunnus obesus*) during bulk storage in controlled atmospheres [J]. Food Chem,2005,89(3):347-354.

[10] 李念文,汤元睿,谢 晶,等. 物流过程中大眼金枪鱼(*Thunnus obesus*)的品质变化 [J]. 食品科学,2013,34(14):319-323.
LI N W,TANG Y R,XIE J,et al. Physicochemical quality properties of *thunnus obesus* during logistical process [J]. Food Science,2013,34(14):319-323.

[11] SALIH A M,SMITH D M,PRICE J F,et al. Modified extraction 2-thiobarbituric acid method for measuring lipid

oxidation in poultry [J]. Poultry Sci,1987,66(9):1483-1488.

[12] 食品安全国家标准:食品中挥发性盐基氮的测定:GB 5009.228－2016 [S].北京:中华人民共和国农业部,2016.

[13] 食品安全国家标准:食品微生物学检验菌落总数测定:GB 4789.2－2010 [S].北京:中华人民共和国卫生部,2010.

[14] 姜晓文,韩剑众.生鲜猪肉持水性的核磁共振研究 [J].食品工业科技,2009(7):128-130.
JIANG X W,HAN J Z. LF-NMR studies of water-holding capacity in fresh meat [J]. Science and Technology of Food Industry,2009(7):128-130.

[15] LIU J J,ZHU K K,YE T,et al. Influence of konjac glucomannan on gelling properties and water state in egg white protein gel [J]. Food Res Int,2013,51:437-443

[16] 马海建,施文正,宋　洁,等.超高压处理对草鱼鱼肉品质的影响 [J].现代食品科技,2015,31(12):283-290.
MA H J,SHI W Z,SONG J,et al. Effects of ultra-high pressure treatment on the quality of grass carp [J]. Modern Food Science and Technology,2015,31(12):283-290.

[17] 王　婷,车　旭,杜若源,等.银杏叶提取液对冰藏鲳鱼品质变化的影响 [J].食品工业科技,2016,37(3):323-328.
WANG T,CHE X,DU R Y,et al. Effect of ginkgo biloba leaves extract on the quality of pomfret (*Pampus argenteus*) during ice storage [J]. Science and Technology of Food Industry,2016,37(3):323-328.

[18] 徐永霞,刘　滢,张朝敏,等.超高压处理对冷藏鲈鱼品质的影响 [J].食品与发酵工业,2015,41(1):85-89.

[19] 郑　捷,尚校兰,刘安军.超高压处理对海鲈鱼鱼肉凝胶形成作用的研究 [J].食品科学,2013,34(19):88-92.
ZHENG J,SHANG X L,LIU A J. Effect of high pressure treatment on gel formation of sea bass skeletal muscle [J]. Food Science,2013,34(19):88-92.

[20] RAMIREZ-SUAREZ J C,MORRISSEY M T. Effect of high pressure processing (HPP) on shelf life of albacore tuna (*Thunnus alalunga*) minced muscle [J]. Innovat Food Sci Emerg Tech,2006(7):19-27.

[21] 李学英,刘会省,杨宪时,等.冻藏温度对南极磷虾品质变化的影响 [J].现代食品科技,2014,30(6):191-195.
LI X Y,LIU H X,YANG X S,et al. Effects of temperature on the quality of Antarctic krill (*Euphausia superba*) during frozen storage [J]. Modern Food Science and Technology,2014,30(6):191-195.

[22] 甘晓玲.超高压处理对南美白对虾虾仁的品质影响 [D].杭州:浙江大学,2012.

[23] LAKSHMANAN R,PARKINSON J A,PIGGOTT J R. High-pressure processing and water-holding capacity of fresh and cold-smoked salmon (*Salmo salar*) [J]. LWT-Food Sci Tech,2007,40(3):544-551.

[24] 雒莎莎.超高压处理对鳙鱼品质的影响 [D].杭州:浙江大学,2012:25-26.

[25] TEIXEIRA B,MARQUES A,MENDES R,et al. Effects of high-pressure processing on the quality of sea bass (*Dicentrarchus Labrax*) fillets during refrigerated storage [J]. Food Bioprocess Tech,2014,7(5):1333-1343.

[26] SENTURK T,ALPAS H. Effect of high hydrostatic pressure treatment (HHPT) on quality and shelf life of Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) [J]. Food Bioprocess Tech,2013,6(9):2306-2318.

[27] 刘明爽,李婷婷,马　艳,等.真空包装鲈鱼片在冷藏与微冻贮藏过程中的新鲜度评价 [J].食品科学,2016,37(2):201-213.
LIU M S,LI T T,MA Y,et al. Freshness evaluation of vacuum packaged perch fillets during refrigeration and partial freezing [J]. Food Science,2016,37(2):201-213.

[28] International Commission on Microbiological Specifications for Foods (ICMSF). Microorganisms in foods 6:microbial ecology of food commodities [M]. 2nd ed. US:Springer,2005.

[29] BINDU J,GINSON J,KAMALAKANTH C K,et al. Physicochemical changes in high pressure treated Indian whiteprawn (*Fenneropenaeus indicus*) during chill storage [J]. Innovat Food Sci Emerg Tech,2013,17:37-42.

[30] 夏敏敏.超高压处理对海参泡发及其品质的影响 [D].济南:齐鲁工业大学,2014:36-37.

[31] AL-DAQAL M M,BAZARAA W A. Extension of shelf life of whole and peeled shrimp with organic acid salts and bifidobacteria [J]. J Food Prot,1999,62(1):51-56.

[32] HUANG H W,LUNG H M,YANG B B,et al. Responses of microorganisms to high hydrostatic pressure processing [J]. Food Control,2014,40:250-259.

[33] HSU C P,HUANG H W,WANG C Y. Effects of high-pressure processing on the quality of chopped raw octopus [J]. LWT-Food Sci Tech,2014,56(2):303-308.

[34] SHAO J H,DENG Y M,JIA N,et al. Low-field NMR determination of water distribution in meat batters with NaCl and polyphosphate addition [J]. Food Chem,2016,200(1):308-314.

[35] 李 侠,孙 圳,杨方威,等.适宜冻结温度保持牛肉蛋白稳定性抑制水分态变 [J].农业工程学报,2015,31(23):238-245.
LI X,SUN Z,YANG F W,et al. Appropriate freezing temperature to maintain beef protein stability and inhibit myowater state changes [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2015,31(23):238-245.

[36] CHEFTEL J C,CULIOLI J. Effects of high pressure on meat:a review [J]. Meat Sci,1997,46(3):211-236.

[37] 杨 华,陆森超,张慧恩,等.超高压处理对养殖大黄鱼风味及品质的影响 [J].食品科学,2014,35(16):244-249.
YANG H,LU S C,ZHANG H E,et al. Effects of high hydrostatic pressure processing on the flavor and quality of cultured yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) [J]. Food Science,2014,35(16):244-249.

# Effect of High Pressure Processing on Quality and Structure of *Lateolabrax Japonicus* Fillets during Cold Storage

ZHAO Hong-Qiang[1],WU Jin-Xin[1],ZHANG Yuan-Yi[1],LAN Wei-Qing[1],
LIU Shu-Cheng[2],SUN Xiao-Hong[1],XIE Jing[1]

(1. *College of Food Science & Technology,Shanghai Ocean University,Shanghai Engineering Research Center of Aquatic Product Processing and Preservation,Shanghai* 201306,*China*;
2. *College of Food Science and Technology,Guangdong Ocean University,Zhanjiang* 524088,*China*)

**Abstract**: In the present work,to investigate the effects of high pressure processing (HPP) treatment on the quality and structure of the perch (*Lateolabrax japonicas*) fillets during cold storage,we treated samples with different HPP conditions (200,250 and 300 MPa for 9 min) and then stored them at 4 ℃ respectively after having them washed and drained. To evaluate the structure of *Lateolabrax japonicas* fillets,we measured their physiochemical parameters,including pH value,hardness,water holding capacity (WHC),thiobar-bituric acid (TBA) value and total volatile basic nitrogen (TVB-N) value,and their microorganism parameter—total viable count (TVC) at 0,4,8,11,13,15 d,and estimated the water transfer by low field-nuclear magnetic resonance (LF-NMR),observed the appearance and microstructure,and analyzed the correlation among the parameters of each group respectively. The results show that the pressure is positively correlated with the change of hardness,TBA,TVB-N,TVC value and negatively correlated with the pH value and WHC. The higher the pressure,the stronger the effects. The results of LF-NMR combined with the WHC analysis also prove the water mobility of the samples and the severe loss of free water under HPP treatments,and the samples exhibited a remarkably milky and cooking-like appearance. The results of microstructural observation for the HPP treated samples indicate that the tissue of the fish muscle becomes blurred and the structure of the muscle fibers compact disorderly,especially for the 300 MPa treated sample. It is shown that HPP can extend the shelf life of *Lateolabrax japonicus* fillets during cold storage for at least 4 d and the optimal condition is 250 MPa,9 min on the whole.

**Key words**: high pressure processing (HPP); *Lateolabrax japonicus*; cold storage; quality change; structural change