超高压处理对草鱼鱼肉品质的影响

马海建，施文正，宋洁，汪之和

（1.上海海洋大学食品学院，上海 201306）（2.上海水产品加工及贮藏工程技术研究中心，上海 201306）

摘要：以草鱼为原料，研究了不同超高压（0.1、100、200、300、400、500 MPa，保压 10 min）处理条件对草鱼菌落总数、挥发性盐基氮（TVB-N）值、硫代巴比妥酸（TBA）值、质构、色差、微观结构及气味和滋味轮廓的影响。结果表明：超高压处理后菌落总数显著降低；TVB-N 值随压力增大呈减小趋势，而 TBA 值呈增大趋势，300 MPa 下 TVB-N 值减少 12.09%，TBA 值增大 0.70 倍；压力≥200 MPa 时，硬度和咀嚼性显著提高，500 MPa 条件下分别增加 0.87 和 2.22 倍；样品总色差随压力升高而逐渐增大，压力≥200 MPa 时，L^*值和白度显著提高；通过扫描电镜观察，超高压处理后鱼肉表面整体结构逐渐趋于紧密均匀；通过电子鼻和电子舌分析，300MPa 及以上压力使气味有所改变，200、400 和 500 MPa 处理后鱼肉滋味和对照组有所差异，但区别不大。综合分析，在草鱼加工和保鲜等应用中选择 300 MPa 处理可能较为合适,冷藏过程中 300 MPa 处理可减缓 TVB-N 值的增加，货架期由 10 d 延长至 16 d。

关键词：超高压；草鱼；品质

文章篇号：1673-9078(2015)12-283-290 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.12.042

Effects of Ultra-high Pressure Treatment on the Quality of Grass Carp

MA Hai-jian, SHI Wen-zheng, SONG Jie, WANG Zhi-he

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

Abstract: The effects of ultra-high pressure (UHP) (0.1，100，200，300，400, and 500 MPa for 10 min) treatments on the quality of grass carp (used as the raw material) were investigated. A number of parameters were examined, including total viable counts, total volatile base nitrogen (TVB-N) values, thiobarbituric acid (TBA) values, texture, color difference, microstructure, volatile odor, and taste. The results showed that total viable counts of grass carp were reduced significantly by UHP treatment. With increasing pressure, TVB-N values declined, whereas TBA values increased. After 300 MPa pressure treatment, TVB-N values decreased by 12.09%, while TBA values increased by 0.7 times. When the pressure exceeded 200 MPa, hardness and chewiness increased pronouncedly, with their values increasing by 0.87 and 2.22 times, respectively, at 500 MPa pressure. Total color difference gradually increased with increasing pressure. When the pressure exceeded 200 MP, the L* value and whiteness were markedly enhanced. Scanning electron microscopy (SEM) demonstrated that the overall surface structure of grass carp muscles with UHP treatment tended to be uniform and compact. The electronic nose and electronic tongue analyses showed that the volatile odor of grass carp treated with > 300 MPa pressure noticeably changed, whereas the taste profiles of grass carp treated at 200, 400, and 500 MPa pressure differed slightly from that of the control group. In conclusion, 300 MPa treatment might be appropriate for the processing and storage of grass carp as the TVB-N values rise at a slower rate at this pressure during cold storage, extending the shelf life from 10 days to 16 days.

Key words: ultra-high pressure; grass carp; quality

我国渔业养殖产量已连续多年位居全球首位，2013 年我国淡水养殖产量达到 2802.43 万 t，其中草鱼养殖产量 506.99 万 t[1]，是我国养殖产量较高的一种淡水经济鱼类，还是我国“四大家鱼”之一。草鱼肉质肥嫩鲜美，蛋白质含量高，生长快，年产量大；鱼肉不仅可满足人们对蛋白质的需求，而且还具有滋补功效，其含有丰富的不饱和脂肪酸，有利于血液循环，富含微量元素硒，可减少辐射伤害。目前我国草鱼主要以鲜活销售为主，几乎没有加工产品，而且由于微生物及酶的作用等原因，在贮藏、加工和销售过程中极易发生腐败变质，影响其品质，因此随着产量的不断上升以及消费者对水产品品质要求的不断提高，草

收稿日期：2015-03-17

基金项目：国家自然科学基金资助项目（31471685；31171764）；国家高技术研究发展计划课题（2011AA100803）；上海市高校知识服务平台项目（ZF1206）；上海市科委工程中心建设（11DZ2280300）

作者简介：马海建（1990-），男，在读研究生，研究方向：水产品加工与贮藏

通讯作者：施文正（1975-），男，博士，副教授，研究方向：水产品加工和食品风味

鱼的加工和保鲜贮藏等问题急需解决。超高压技术（ultra-high pressure, UHP）是一种非热食品加工方法，是将食品放入一个高压容器内，以水等液体为媒介施加一定的压力并保持一定的时间，使原料发生一些生化反应和组织结构变化，从而杀死食品中的微生物、抑制酶的活性、改善食品的结构特性和品质风味并且延长货架期的过程[2]。UHP 主要优点有保持原有营养成分、提高食品的食用品质、延长食品货架期等，可应用于蔬菜水果、肉制品、水产品等的加工和保鲜，具有广阔的应用前景，是国内外学者的一个研究热点。Ramirez-Suarez 等[3]研究表明，长鳍金枪鱼经 310 MPa，6 min 处理后，其菌落总数显著下降，4 ℃条件下货架期可延长至 22 d。杨华等[4]以缢蛏为研究对象，以菌落总数和 TVB-N 值为指标，通过正交试验得出 500 MPa、20 ℃、15 min 为缢蛏最优的超高压保鲜工艺条件。目前国内外报道中关于超高压技术的研究多集中于其杀菌作用以及延长食品货架期上，而超高压处理对新鲜生鱼肉品质影响的研究相对较少。本实验以草鱼为原料，研究了不同压力（0.1、100、200、300、400、500 MPa，保压 10 min）条件处理后草鱼鱼肉块菌落总数、挥发性盐基氮（TVB-N）值、硫代巴比妥酸（TBA）值、质构、色差、微观结构及气味和滋味轮廓的变化，探究超高压处理对草鱼品质的影响，并对较优超高压条件处理后草鱼鱼肉的保鲜效果进行了对比，旨在为超高压技术在草鱼等水产品的加工和贮藏方面的应用提供一些理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

鲜活草鱼，2014 年 12 月购于上海市浦东新区古棕路农贸市场，体重为 1.5~2.0 kg/尾。

1.2 主要试剂及仪器

氯化钠、氧化镁（轻质）、硼酸、盐酸、三氯乙酸等为分析纯，硫代巴比妥酸、营养琼脂为生化试剂，以上试剂均购于上海国药集团化学试剂有限公司。

HPP.L2-600/2 超高压设备，天津华泰森淼生物工程技术有限公司；DZ-400-2D 真空包装机，温州市鹿城区黄龙华能机械厂；VS-1300L-U 型超净台，苏净安泰集团；LDZX-50KBS 高压蒸汽灭菌锅，上海申安公司；BSP-400 生化培养箱，上海博迅实业有限公司；Kjeltec2300 凯氏定氮仪，丹麦 FOSS 公司；UV-1800PC 紫外可见分光光度计，上海美谱达仪器有限公司；TA-XT Plus 质构仪，英国 Stable Micro System 公司；CHROMA METER CR-400 色彩色差计，日本 Minolta 公司；Hitachi S-3400NⅡ型扫描电镜，上海日立高新技术有限公司；FOX-4000 气味指纹分析仪（电子鼻），法国 Alpha M.O.S 公司；ASTREE 电子舌，法国 Alpha M.O.S 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品准备

鲜活草鱼运回实验室即杀，去头、去内脏，沿脊椎剖为两半，取脊背肉，切成长 8 cm×4 cm×1 cm 左右的鱼肉块，放入真空包装袋中进行真空包装。抽气速率 20 m^3/h，抽气时间 10 s，电热封口时间 1.5 s。

将真空包装好的鱼肉块样品分为六组，以未进行超高压处理的样品为对照组（0.1 MPa）。其余五组样品分别依次置于超高压腔中（高压介质为水），在不同设定压力（100、200、300、400、500 MPa）下进行超高压处理，保压时间为 10 min。升压速率为 8 MPa/s 左右，卸压处理在 10 s 左右完成。

1.3.2 菌落总数的测定

参考 GB/T 4789.2-2010《食品卫生微生物学检验 菌落总数测定》[5]进行测定。

1.3.3 挥发性盐基氮（TVB-N）值的测定

依据半微量凯氏定氮原理，使用 Kjeltec2300 自动凯氏定氮仪进行测定。

1.3.4 硫代巴比妥酸（TBA）值的测定

参考汤元睿等[6]的方法，略有修改。准确称取鱼肉样品 5.00 g，加入 25 mL 20%三氯乙酸溶液和 20 mL 蒸馏水，匀浆 60 s，静置 1 h。8000 r/min 离心 10 min，取上清液过滤后定容至 50 mL，取 5 mL 滤液加入 5 mL 0.02 mol/L 硫代巴比妥酸溶液，沸水浴中反应 20 min，取出，流动水冷却 5 min 后用分光光度计在 532 nm 处测吸光度 A。以蒸馏水取代滤液为空白样。TBA 值 =A×7.8 mg/100 g。

1.3.5 质构的测定

参考汤元睿等[6]的方法，略有修改。采取横向切片，将样品切成 2 cm×2 cm×1 cm 大小的肉块。测定模式为 TPA 测定，探头为不锈钢 P/6 平底柱形探头，测试前速率 3.00 m/s，测试速率 1.00 mm/s、返回速率 1.00 mm/s、压缩程度 50%，2 次压缩之间的停留时间为 5 s，触发值 5 g，数据采集速率 200 pps。每组样品测定 6 次。

1.3.6 色差的测定

将样品切成厚度为 10 mm 的薄片，使用色差计 CR-400 分别测定各个样品的 L^*、a^*、b^*值，每组取 3 个薄片作为测定样品，每个试样检测 6 次，结果取平

均值。其中，L^*值表示亮度，a^*值为红度值，表示有色物质的红绿偏向，b^*值为黄度值，表示有色物质的黄蓝偏向。白度（W）的计算公式如下：

$$W=100-[(100-L^*)^2+a^{*2}+b^{*2}]^{1/2}$$

总色差（△E）是指处理组样品的颜色与对照组颜色平均值之间的色差。计算公式如下：

$$\triangle E=[(\triangle L^*)^2+(\triangle a^*)^2+(\triangle b^*)^2]^{1/2}$$

式中：$\triangle L^*$、$\triangle a^*$和$\triangle b^*$分别是处理组样品的 L^*、a^*、b^*值与对照组样品的 L^*、a^*、b^*平均值之差。

1.3.7 扫描电镜（SEM）观察

将鱼肉用刀片切成 3 mm×3 mm×1.5 mm 的小片，放入 2.5%的戊二醛溶液，4 ℃固定过夜，倒掉固定液，用 0.1 mol/L，pH 值为 7.3 的磷酸缓冲液漂洗样品三次，每次 15 min。然后用 30%、50%、70%、80%、90%、95%和 100%的乙醇溶液对样品进行梯度洗脱，然后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，离子溅射仪喷金后，于放大 6000 倍条件下用扫描电镜观察，加速电压为 20 kV。

1.3.8 电子鼻分析

分别准确称取各组鱼肉样品 1.0 g，加 1.0 mL 0.18 g/mL NaCl 溶液，匀浆，置于 10 mL 进样瓶中封盖待测，每组分别做 5 个平行。

电子鼻参数：以干燥洁净空气为载气，流速 150 mL/min；顶空平衡温度 50 ℃，顶空平衡时间 300 s，振荡速度 500 r/min；注射针温度 60 ℃，进样体积 2500 μL，注射速度 2500 μL/s，即 1 s 完成；数据采集时间 120 s，获取延滞时间 10 min。

1.3.9 电子舌分析

准确称取 2 g 鱼肉于 50 mL 离心管中，加入 25 mL 高纯水，静置 15 min，4 ℃下 10000 r/min 离心 10 min，取其上清液进行过滤，将滤液定容到 100 mL。

电子舌参数[7]：平衡溶液为去离子水，样品体积 80 mL，分析时间 180 s，采集时间 120 s，传感器每秒采集一个数据，选取第 120 s 的响应值作为原始数据信号进行分析，冲洗时间 10 s，样品温度 20 ℃左右；每个样品平行重复测定 7 次，取后 3 次数据作为主成分分析（PCA）的原始数据进行分析。

1.4 数据处理

实验数据均由 SPSS21.0 等软件进行分析处理。

2 结果与分析

2.1 超高压处理对草鱼鱼肉菌落总数的影响

对于水产品来说，菌落总数是评价其品质好坏和货架期长短的一个非常有效的指标。不同处理压力条件下草鱼的菌落总数如图 1 所示。未经超高压处理的对照组样品的菌落总数是 3.85 log CFU/g，经超高压处理后各组草鱼鱼肉的菌落总数均显著降低（$p<0.05$），提高了草鱼鱼肉食用的安全质量；经 100、200、300、400、500 MPa 的高压条件处理后，各组样品的菌落总数分别是 3.73、3.31、3.02、2.17、1.97 log CFU/g，随着压力的增加，草鱼的菌落总数呈逐渐减少的趋势，且各组间均差异显著，500MPa 处理后草鱼鱼肉的菌落总数达到为最低值，相比对照组样品减少了 1.88 log CFU/g。说明超高压处理具有非常明显的灭菌作用，且压力越高，灭菌效果越好。在超高压环境中细胞膜受到损坏，从而导致细胞的渗漏，细胞结构被破坏，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，抑制酶的活性和遗传物质的复制[8]，所以经超高压处理的食品中原始微生物的数量大量减少，从而达到改善草鱼鱼肉品质质量的作用。

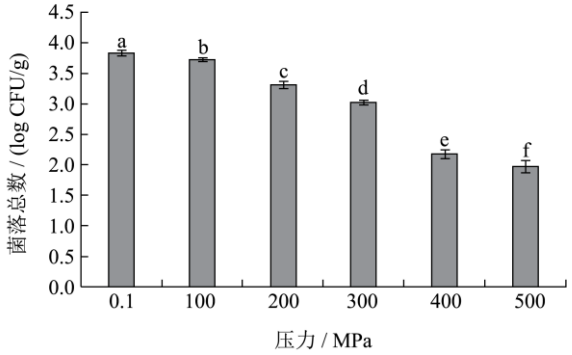


图 1 超高压处理对草鱼鱼肉菌落总数的影响

Fig.1 Effect of UHP treatment on the total viable grass carp counts

注：不同字母表示两组间菌落总数有显著性差异($p<0.05$)。

2.2 超高压处理对草鱼鱼肉挥发性盐基氮（TVB-N）值的影响

挥发性盐基氮是肉中蛋白质等含氮化合物在微生物以及酶的作用下，分解产生的胺类及氨等具挥发性的碱性含氮物质，是评价鱼肉等水产品鲜度品质的一个重要指标，TVB-N 值越大表明水产品腐败程度越严重。图 2 为不同压力条件下 TVB-N 值的变化情况。对照组样品的 TVB-N 值是 12.74 mg/100 g，100 MPa 处理后草鱼鱼肉的 TVB-N 值与对照组差异不显著（$p>0.05$）；200 MPa、300 MPa 和 400 MPa 处理后的三组样品 TVB-N 值相比对照组均显著减少（$p<0.05$），而三组间的 TVB-N 值差异不显著，其中 300 MPa 处理后 TVB-N 值是 11.20 mg/100 g，减少了 12.09%；500 MPa 处理后草鱼鱼肉 TVB-N 值是 9.01 mg/100 g，显

著低于其他各组，相比对照组样品减少了 29.28%。总之，当压力≥200 MPa 时，超高压处理可降低 TVB-N 值，提高草鱼的鲜度品质。TVB-N 值的减小可能是由于超高压处理减少了微生物的数量，较高的压力使得挥发性盐基氮中一些氨氮类物质随着水分流失，超高压使样品中的糖原成分酸化后产生了乳酸，结合了部分弱碱性的氨氮类物质等原因导致[9]。杨华等[4]的研究也表明缢蛏的 TVB-N 值随着压力的增加呈减小的趋势，低于 400 MPa 时，随着压力的增大下降显著，高于 400 MPa 时，仍呈下降趋势，但不明显。

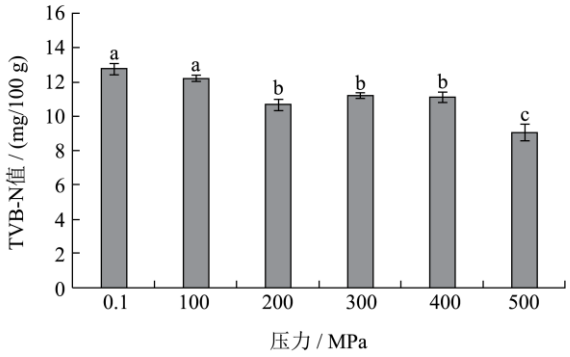


图 2 超高压处理对草鱼鱼肉挥发性盐基氮（TVB-N）值的影响

Fig.2 Effect of UHP treatment on the TVB-N values of grass carp

注：不同字母表示两组间 TVB-N 值有显著性差异（p<0.05）。

2.3 超高压处理对草鱼鱼肉硫代巴比妥酸（TBA）值的影响

TBA 值是反映水产品脂肪氧化酸败程度的良好指标，不饱和脂肪酸经过氧化得到的降解产物丙二醛（MAD）与 TBA 反应生成了稳定的粉红色化合物，用来反映鱼肉脂肪的氧化程度，TBA 值越大，鱼肉脂肪的氧化腐败程度越高。图 3 为不同压力条件的超高压处理后草鱼鱼肉 TBA 值的变化情况。对照组样品的 TBA 值是 0.94 mg/kg，100 MPa 处理后样品的 TBA 值和对照组差异不显著（p>0.05）；经 200 MPa 以上压力处理后草鱼鱼肉的 TBA 值相比对照组均显著升高（p<0.05），且随着压力的增加，TBA 值呈逐渐增大趋势，其中 200 MPa 和 300 MPa 处理的两组样品 TBA 值差异不显著，300 MPa 处理后草鱼鱼肉 TBA 值是 1.60 mg/kg，增加了 0.70 倍，500 MPa 处理后 TBA 值是 3.04 mg/kg，增加了 2.23 倍。这说明 200 MPa 以上压力的处理能显著降低草鱼鱼肉中脂肪的稳定性，加速脂肪的氧化过程。这可能是由于高压可导致肌红蛋白及氧合肌红蛋白等色素蛋白变性，释放铁等金属离子，而金属离子可以促进脂肪氧化。有研究表明，经超高压处理后大黄鱼的 TBA 值也显著升高，且随压力的增加而逐渐上升[10]。

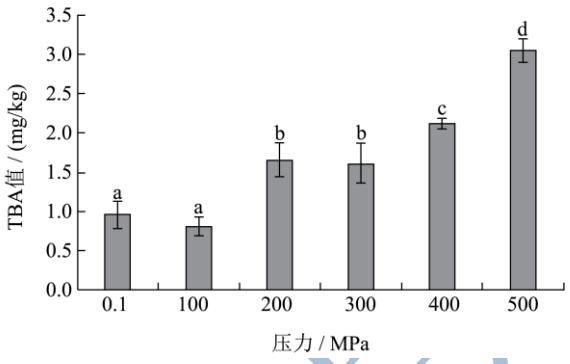


图 3 超高压处理对草鱼鱼肉硫代巴比妥酸（TBA）值的影响

Fig.3 Effect of UHP treatment on the TBA values of grass carp

注：不同字母表示两组间 TBA 值有显著性差异（p<0.05）。

2.4 超高压处理对草鱼鱼肉质构的影响

TPA 质构测试又被称为两次咀嚼测试，主要是通过模拟人口腔的咀嚼运动，对样品进行两次压缩，得到质构测试曲线，从中分析得出与人感官评价相关质构特性参数。表 1 为超高压处理对草鱼鱼肉 TPA 参数的影响，由表 1 可知，超高压处理对草鱼鱼肉的质构有明显影响。超高压处理可提高鱼肉硬度，200 MPa 及以上压力处理后草鱼鱼肉样品的硬度显著增大（p<0.05），其中 200 MPa 和 300 MPa 处理的两组样品的硬度差异不显著（p>0.05），相比对照组，300 MPa 处理后鱼肉的硬度增加了 0.58 倍，500 MPa 处理后增加了 0.87 倍；超高压处理对弹性和内聚性影响相对较小，300 MPa 以下压力处理后草鱼鱼肉样品的弹性和对照组无显著性差异，300 MPa 以上压力处理后弹性显著增大，500 MPa 处理后弹性增加了 0.11 倍，400 MPa 和 500 MPa 处理后鱼肉的内聚性显著增大，相比对照组，分别增加了 0.38 和 0.56 倍；咀嚼性是一项质地综合评价指标，数值上用硬度、内聚性和弹性的乘积表示，草鱼鱼肉样品的咀嚼性随着处理压力的不断升高而逐渐增大，200 MPa 及以上压力处理可显著提高其咀嚼度，500 MPa 处理后鱼肉咀嚼度增加了 2.22 倍。总体来看，当压力≥300 MPa 时，超高压处理可明显改善提高草鱼鱼肉的质地品质。超高压处理对肌原纤维蛋白质有修饰作用，超高压处理对鱼肉制品质构的影响主要是通过对蛋白质等大分子物质结构的改变而起作用的[2]。Ramirez-Suarez 等[3]研究发现超高压可以明显提高长鳍金枪鱼鱼肉的硬度，并认为可能是由于高压促进分子间二硫键的形成，诱导肌球蛋白分子聚集变性等引起的。

表 1 超高压处理对草鱼鱼肉 TPA 参数的影响

Table 1 Effect of UHP treatment on the TPA values of grass carp

	0.1 MPa	100 MPa	200 MPa	300 MPa	400 MPa	500 MPa
硬度/g	583.28±52.97^{a}	639.77±50.27^{a}	868.90±99.08^{b}	923.57±66.65^{bc}	954.22±65.57^{c}	1092.43±53.50^{d}
弹性	0.8559±0.0508^{a}	0.8923±0.0340^{abc}	0.8833±0.0307^{ab}	0.9109±0.0084^{bcd}	0.9305±0.0488^{cd}	0.9486±0.0197^{d}
内聚性	0.3206±0.0499^{a}	0.3370±0.0393^{a}	0.3902±0.0145^{b}	0.3505±0.0465^{ab}	0.4431±0.0323^{c}	0.5015±0.0261^{d}
咀嚼性/g	161.44±37.41^{a}	193.18±31.62^{a}	299.17±34.47^{b}	296.28±53.37^{b}	391.54±22.79^{c}	519.75±39.00^{d}

注：不同字母表示同一行各组间有显著性差异（p<0.05）。

2.5 超高压处理对草鱼鱼肉色差的影响

水产品的色差变化是影响消费者可接受性的一个主要因素，是影响其感官品质和市场价值的重要指标。表 2 为超高压处理对草鱼色差的影响。总色差反映了处理前后鱼肉颜色的改变，总色差越小，则与对照组样品的颜色越接近，草鱼鱼肉样品的总色差随着压力升高而逐渐增大，一般来说，总色差>10 说明处理组颜色变化较对照组有明显差异，从表中可以看出，200 MPa 以上压力处理会使草鱼肉的颜色有明显改变，200 和 300 MPa 处理条件下样品的总色差分别是 16.49 和 19.16，500 MPa 条件下总色差则增大到了 31.18；L^{*}值和白度的变化情况相似，100 MPa 处理后，草鱼鱼肉的 L^{*}值和白度变化不显著（p>0.05），但当压力达到 200 MPa 及以上时，鱼肉表面颜色逐渐变白，呈不透明状，产生熟化外观，各组样品的 L^{*}值和白度均显著增大（p<0.05），且处理压力越大，其增幅越大，500 MPa 处理后，鱼肉的 L^{*}值达到 84.15，相比对照组样品增加了 58.27%，超高压处理对 L^{*}值和白度有明显影响，这可能是由于超高压处理引起肌原纤维蛋白和肌浆蛋白变性从而使鱼肉表面颜色发生改变所致[11]；经超高压处理后草鱼鱼肉的 a^{*}值相比对照组显著减小，300 MPa 处理后样品的 a^{*}值减小到-1.73，而随着压力的继续升高，经 300 MPa、400 MPa 和 500 MPa 处理后的三组样品 a^{*}值差异不显著，a^{*}值的减小可能是由于超高压处理过程中肌红蛋白发生氧化形成高铁肌红蛋白所致[12]；经超高压处理后草鱼鱼肉的 b^{*}值有明显提高，雒莎莎等[13]研究表明鳙鱼经超高压处理后也有类似现象。

表 2 超高压处理对草鱼鱼肉色差的影响

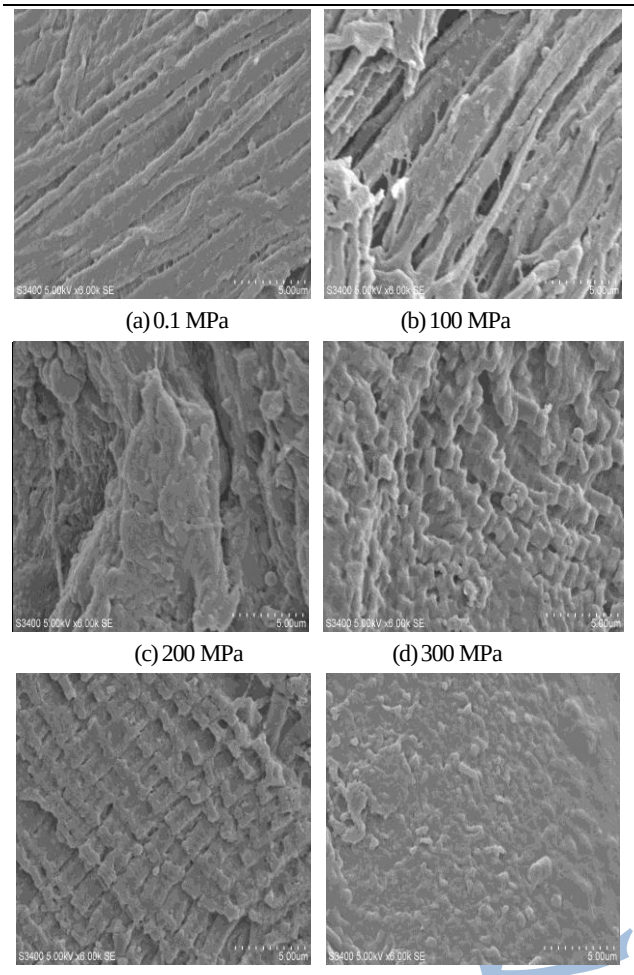
Table 2 Effect of UHP treatment on the color values of grass carp

	0.1 MPa	100 MPa	200 MPa	300 MPa	400 MPa	500 MPa
L^{*}	53.17±0.59^{a}	54.22±0.93^{a}	69.60±0.95^{b}	72.18±0.92^{c}	77.14±0.78^{d}	84.15±0.68^{e}
a^{*}	0.19±0.08^{d}	-0.14±0.15^{c}	-1.03±0.17^{b}	-1.73±0.18^{a}	-1.66±0.15^{a}	-1.77±0.11^{a}
b^{*}	-1.03±0.34^{a}	0.20±0.25^{c}	-0.33±0.12^{b}	0.45±0.10^{c}	0.80±0.16^{d}	1.89±0.17^{e}
白度(W)	53.16±0.59^{a}	54.22±0.93^{a}	69.58±0.94^{b}	72.12±0.92^{c}	77.06±0.76^{d}	83.94±0.64^{e}
总色差(Δ E)		1.82±0.37^{a}	16.49±0.95^{b}	19.16±0.93^{c}	24.11±0.79^{d}	31.18±0.70^{e}

注：不同字母表示同一行各组间有显著性差异（p<0.05）。

2.6 超高压处理对草鱼鱼肉微观结构的影响

图 4 为经不同压力条件的超高压处理后草鱼鱼肉样品的扫描电镜（SEM）图。通过扫描电镜观察，可看出超高压处理后草鱼鱼肉的表面肌肉结构与对照组样品的结构有明显不同。对照组样品的肌肉表面结构较为稀松，肌纤维条理较为清晰，呈现较为完整、有序的排列；100 MPa 处理后草鱼鱼肉表面的肌纤维结构开始变粗，变的紧致；经 200 MPa 以上压力处理后，鱼肉表面纹理逐渐模糊，肌纤维结构间空隙逐渐变小，开始聚集在一起，整体结构趋于紧密；其中 300 MPa 和 400 MPa 处理后的鱼肉表面肌肉组织逐渐变的呈网状结构；压力达到 500 MPa 时，鱼肉表面组织之间结合更加致密均匀。这可能与超高压处理可以影响对蛋白质分子立体结构有贡献的氢键、疏水键、离子键等非共价键，使蛋白质变性，三级、四级结构发生改变，蛋白质分子间交联，可能出现胶凝化现象有关。雒莎莎等[13]对鳙鱼的研究也有类似结果，经 450 MPa 处理后，肌原纤维的肌节已被彻底破坏，肌原纤维间隙消失，蛋白质分子间交联，形成坚实的凝胶网络，蛋白质胶凝化现象严重。Cheftel 等[14]也曾报道当压力达到 200 MPa 时，蛋白质即开始出现胶凝化。由于超高压处理使草鱼肌肉的微观结构发生改变，从而对鱼肉的硬度、弹性、内聚性和咀嚼性等质构特性参数的变化产生影响。



(a) 0.1 MPa (b) 100 MPa

(c) 200 MPa (d) 300 MPa

(e) 400 MPa (f) 500 MPa

图 4 不同超高压处理条件下草鱼肌肉微观结构的扫描电镜图（×6000）

Fig.4 SEM images of grass carp treated under different UHP conditions

2.7 不同压力处理的草鱼鱼肉电子鼻数据主成分分析

电子鼻是由气敏传感器阵列、信号处理器系统、模式识别系统等器件组成，利用传感器阵列的响应曲线识别样品挥发性气味，对检测的气味进行判别和分析。主成分分析（PCA）是对传感器响应的特征向量矩阵进行数据转换和降维，并进行线性分类，损失很少信息的前提下将多个指标转化为少数重要综合指标，最后结果以二维散点图形式显示。图 5 为不同压力条件下各组样品电子鼻数据的主成分分析图，第一主成分（PC1）贡献率达到了 99.79%，第一主成分（PC1）和第二主成分（PC2）贡献率之和为 99.88%，说明主成分很好的反映原来多指标的信息。6 组样品中，100 MPa 和 200 MPa 处理后的两组样品和对照组的样品分布在右侧区域，且三组的数据点相距很近，气味轮廓有所重叠，不能有效区分，说明三组样品的气味相似，100 MPa 和 200 MPa 处理对草鱼鱼肉的气味无明显影响；300 MPa、400 MPa、500 MPa 处理的三组样品的数据点均分布在左侧区域，和对照组的数据点的距离较远，且三组样品的轮廓也没有相互重叠，可有效区分，说明 300 MPa 及以上的压力处理对草鱼鱼肉的气味有较明显的影响，且处理压力大小不同，对气味的影响也并不相同。一般说来，超高压处理对共价键没有影响，因此不会影响风味物质和维生素等小分子化合物，从而氨基酸、核苷酸等小分子风味物质得以保留，但超高压可以通过影响食品原料内部的化学和酶促反应的进程从而对食品的风味有一定的影响[13]，对于肉类而言，这种改变主要包括影响脂质氧化和蛋白水解等方面，而脂质氧化是形成醛、酮、醇等挥发性物质的主要途径之一。Ana 等[15]的研究表明，在 12 ℃条件下，400 MPa 保压处理 10 min 后，鸡胸脯肉和牛肉的挥发性风味物质含量发生显著变化，一些醇类和醛类物质含量下降，但 2,3-丁二酮、2-丁酮等一些物质的含量远远多于对照组。

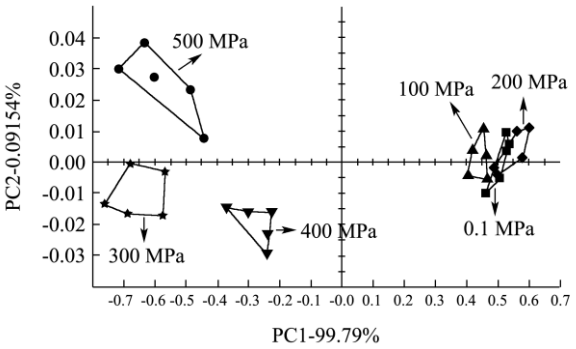


图 5 各组样品电子鼻数据的主成分分析（PCA）图

Fig.5 PCA analysis of E-nose data for each sample

2.8 不同压力处理的草鱼鱼肉电子舌数据主成分分析

电子舌是一种仿生物味觉模式建立起来的新型检测系统，由交互敏感传感器阵列、信号调整电路以及模式识别算法等构成，可对样品的整体滋味轮廓进行响应，具有快速、简便和安全等优点。对电子舌采集得到的数据进行主成分分析，结果如图 6 所示。PC1 和 PC2 的贡献率分别为 69.58%和 20.60%，累计贡献率达到 90.18%，说明基本涵盖了原始数据的绝大部分信息。总体来看，6 组样品数据点之间的距离均相对较近，说明超高压处理对滋味影响不大。其中 100 MPa 和 300 MPa 处理的两组样品和对照组样品的滋味轮廓有所重叠，不能有效区分，说明 100 MPa 和 300 MPa

处理对草鱼鱼肉的滋味无明显影响；而 200 MPa、400 MPa、500 MPa 三组样品的滋味轮廓和对照组的轮廓均无重叠，可有效区分，但差异主要体现在贡献率较低的第二主成分轴上，且各组数据点间距离较近，说明 200 MPa、400 MPa、500 MPa 处理后的三组草鱼鱼肉的滋味和对照组有所差异，但区别不大。

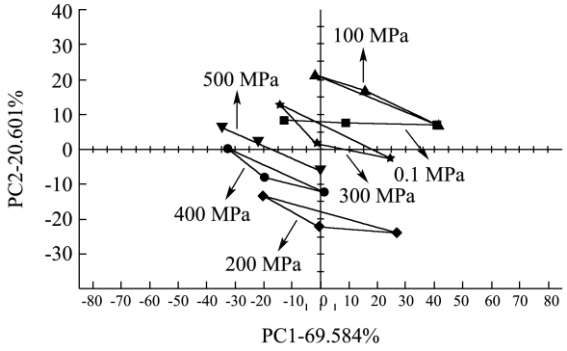


图 6 各组样品的电子舌数据主成分分析（PCA）图

Fig.6 PCA analysis of E-tongue data for each sample

2.9 超高压处理后草鱼鱼肉冷藏过程中挥发性盐基氮（TVB-N）值的变化

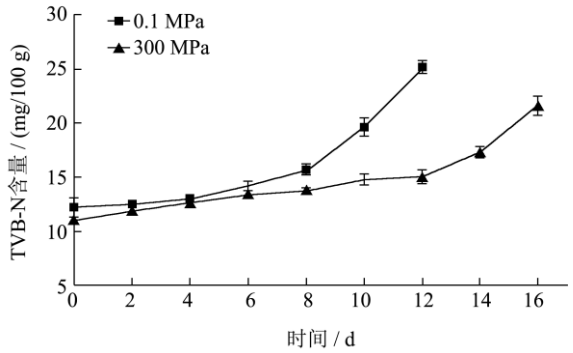


图 7 冷藏过程中草鱼鱼肉 TVB-N 值的变化

Fig.7 Changes in the TVB-N values of grass carp during cold storage

超高压处理对草鱼鱼肉品质方面有较好的改善作用，综合以上指标分析，在草鱼鱼肉加工和保鲜等应用中选取 300 MPa 处理可能较为合适。对 300 MPa，10 min 处理后的草鱼鱼肉进行冷藏实验，图 7 为对照组（0.1 MPa）和 300 MPa 处理组的鱼肉在冷藏（4±1 ℃）过程中 TVB-N 的变化情况。两组样品的 TVB-N 值都随着冷藏时间的延长而不断提高，在贮藏前期均为缓慢上升，但在贮藏 8 d 以后，对照组 TVB-N 值上升剧烈，而 300 MPa 处理组的变化仍较为缓慢。我国 GB2733-2005《鲜、冻动物性水产品卫生标准》[16]规定草鱼等淡水鱼的 TVB-N 值不得超过 20 mg/100 g，贮藏到第 10 d 时，对照组鱼肉的 TVB-N 值达到 19.63 mg/100 g，已接近可食用标准上限；对照组样品在第 12 d 时 TVB-N 值达到 25.15 mg/100 g，表明鱼肉已腐败变质，不可食用；而 300 MPa 处理组鱼肉的 TVB-N 值为 14.98 mg/100 g，仍未超过食用标准；300 MPa 处理组样品在贮藏到第 16 d 时，开始超过国家标准，TVB-N 值为 21.60 mg/100 g，300 MPa 处理后草鱼鱼肉的货架期由 10 d 延长至 16 d。这表明超高压处理可明显减缓草鱼鱼肉在冷藏期间 TVB-N 的增加，延缓腐败变质的进程，延长草鱼鱼肉的货架期。

3 结论

超高压处理具有显著的杀菌作用，可提高草鱼的食用品质质量，且压力越高，灭菌效果越好，其中 300 MPa 处理后菌落总数由 3.85 log CFU/g 减少到 3.02 log CFU/g；当压力≥200 MPa 时，TVB-N 值有所减小，而 TBA 值则明显升高，其中 200 和 300 MPa 处理条件下的两组样品的 TVB-N 值和 TBA 值差异不显著；200 MPa 及以上压力可显著提高硬度和咀嚼性，400 MPa 和 500 MPa 处理使弹性和内聚性显著增大，总体来看，压力≥300 MPa 时，超高压处理可明显提高鱼肉的质地品质；压力≥200 MPa 时，鱼肉白度增大，色泽有所改变，产生熟化外观，300 和 500 MPa 处理后总色差分别是 19.16 和 31.18；扫描电镜观察表明超高压处理后鱼肉表面结构逐渐变的紧密均匀，出现胶凝化现象；电子鼻和电子舌分析表明，100 和 200 MPa 处理对草鱼鱼肉气味无明显影响，300 MPa 及以上压力使气味有所改变，200、400 和 500 MPa 处理后鱼肉的滋味和对照组有所差异，但区别不大。综合分析，超高压处理对草鱼鱼肉品质方面有较好的改善作用，在草鱼加工和保鲜等方面的应用中选择 300 MPa 处理可能较为合适，冷藏实验表明 300 MPa 处理可减缓草鱼鱼肉在冷藏期间 TVB-N 值的上升，货架期由 10 d 延长至 16 d。超高压处理在改善鱼肉品质、加工和保鲜贮藏等方面有着广阔的应用前景，通过这些方面的研究，为超高压在草鱼等水产品加工和保鲜中应用的商业化提供了一定的理论依据。

参考文献

[1] 农业部渔业局.中国渔业统计年鉴 2014[M].北京:中国农业出版社,2014
Bureau of Fisheries of the Ministry of Agriculture. China Fishery Statistical Yearbook [M]. China Agriculture Press, 2014

[2] 朱松明,苏光明,王春芳,等.水产品超高压加工技术研究与应用[J].农业机械学报,2014,45(1):168-177

ZHU Song-ming, ZU Guang-ming, WANG Chun-fang, et al. Research and application on high-pressure processing of aquatic products [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 168-177

[3] Ramirez-Suarez J C, Morrissey M T. Effect of high pressure processing (HPP) on shelf life of albacore tuna (*Thunnus alalunga*) minced muscle [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2006, 7(1): 19-27

[4] 杨华,张李玲,张慧恩,等.缢蛏超高压保鲜工艺的研究[J].食品科技,2014,39(4):129-134
YANG Hua, ZHANG Li-ling, ZHANG Hui-en, et al. High hydrostatic pressure (HHP) preservation process of Sinonovacula constricta [J]. Food Science and Technology, 2014, 39(4): 129-134

[5] GB/T 4789.2-2010.食品微生物学检验:菌落总数测定[S].中华人民共和国国家标准
GB/T 4789.2-2010. Food microbiological examination: Aerobic plate count [S]. Sate Standard of the People's Republic of China

[6] 汤元睿,谢晶,徐慧文,等.相变蓄冷工艺在金枪鱼冷链物流中的应用研究[J].现代食品科技,2015,31(1):173-178
TANG Yuan-rui, XIE Jing, XU Hui-wen, et al. Application of Cold Storage Phase-Change Technology in Cold Chain Logistics of Tuna (*Thunnus obesus*) [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(1): 173-178

[7] 刘源,仇春泱,王锡昌,等.养殖暗纹东方鲀肌肉中呈味肽的分离鉴定[J].现代食品科技,2014,30(8):38-42
LIU Yuan, QIU Chun-yang, WANG Xi-chang, et al. Isolation and identification of flavor peptides in cultured puffer fish (*takifugu obscurus*) [J]. Modern Food Science and Technology, 2014, 30(8): 38-42

[8] Huang HW, Lung HM, Yang BB, et al. Responses of microorganisms to high hydrostatic pressure processing [J]. Food Control, 2014, 40: 250-259

[9] Briones-Labarca V, Perez-Won M, Zamarca M, et al. Effects of high hydrostatic pressure on microstructure, texture, colour and biochemical changes of red abalone (*Haliotis rufecens*) during cold storage time [J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2012, 13: 42-50

[10] 杨华,陆森超,刘丽君,等.超高压处理对养殖大黄鱼保鲜效果的影响[J].食品科学,2014,35(24):331-336
YANG Hua, LU Sen-chao, LIU Li-jun, et al. Effects of high hydrostatic pressure (HHP) treatment on preservation of cultured large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*) [J]. Food Science, 2014, 35(24): 331-336

[11] S Jung, M Ghoul, M de Lamballerie-Anton. Influence of high pressure on the color and microbial quality of beef meat [J]. LWT-Food Science and Technology, 2003, 36(6): 625-631

[12] Grossi A, Søltoft-Jensen J, Knudsen J C, et al. Synergistic cooperation of high pressure and carrot dietary fibre on texture and colour of pork sausages [J]. Meat science, 2011, 89(2): 195-201

[13] 雒莎莎.超高压处理对鳙鱼品质的影响[D].杭州:浙江大学,2012
LUO Sha-sha. Impact of High Pressure Processing on the Quality of *Aristichthys nobilis* Muscle [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012

[14] Cheftel J C, Culioli J. Effects of high pressure on meat: a review [J]. Meat Science, 1997, 46(3): 211-236

[15] Rivas-Cañedo A, Fernández-García E, Nuñez M. Volatile compounds in fresh meats subjected to high pressure processing: Effect of the packaging material [J]. Meat Science, 2009, 81(2): 321-328

[16] GB 2733-2005.鲜、冻动物性水产品卫生标准[S].中华人民共和国国家标准
GB 2733-2005. Hygienic standard for fresh and frozen marine products of animal origin [S]. Sate Standard of the People's Republic of China