

湿腌时盐浓度对草鱼肌肉组织结构和品质的影响

姜晶丹^{1,2}, 杨明远^{1,2}, 许长华^{1,2}, 施文正^{1,2}, 卢瑛^{1,2*}

(1.上海海洋大学食品学院, 农业部水产品贮藏保鲜质量安全风险评估实验室, 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: 为探究湿腌时盐浓度对草鱼肌肉组织结构及其品质变化的影响, 本文以草鱼为原料, 利用离心损失率、硫代巴比妥酸值(thiobarbituric reactive substances, TBARs)、十二烷基硫酸钠聚丙烯酰胺凝胶电泳(sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis, SDS-PAGE)、扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)、透射电镜(transmission electron microscopy, TEM)、傅里叶红外及低场核磁共振分析, 探讨了湿腌过程中盐浓度对草鱼肌肉的蛋白质、水分、脂肪、肌肉组织结构以及质构的影响作用。结果表明: 1) 盐浓度从3%增加至12%过程中草鱼粗蛋白含量下降了2%, 离心损失率下降了8%, TBARs值增加了2倍。2) 低场核磁共振结果分析发现随着盐浓度的增加, 鱼肉组织中的结合水与自由水转化为不易流动水。3) 红外二阶图谱结果显示腌制后的1747 cm^{-1} 峰强度明显降低, 3%盐浓度的1612-1698 cm^{-1} , 1523-1553 cm^{-1} 峰强度有明显增加, 随着盐浓度增加, 峰强度逐渐降低。4) SEM和TEM结果发现3%盐浓度下鱼肉肌纤维变模糊, 但肌浆组织保持原状, 盐浓度为12%时, 肌浆形态变松散。5) 12%盐浓度会破坏鱼肉蛋白质的空间结构, 使得鱼肉组织变松散, 水分流失增加, 降低鱼肉的食用品质, 3%盐浓度对鱼肉质构的影响最小。本研究结果可为今后高品质、方便水产制品的开发提供科学依据。

关键词: 湿腌; 盐浓度; 草鱼; 品质; 肌肉组织; 质构

Effects of Salt Concentration on Muscle Tissue Structure and Quality of Grass Carp during Wet Pickling

JIANG Jingda^{1,2}, YANG Mingyuan^{1,2}, XU Changhua^{1,2}, SHI Wenzheng^{1,2}, LU Ying^{1,2*}

(1. Shanghai Ocean University, Food Institute, Ministry of Agriculture Aquatic Products Storage and Quality Assurance Risk Assessment Laboratory, Shanghai 201306, China; 2. Shanghai Aquatic Products Processing and Storage Engineering Technology Research Center, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to investigate the effect of salt concentration on the structure and quality of grass carp muscle during wet pickling, the effects of salt concentration on the protein, water, fat, muscle tissue structure and texture of grass carp muscle during wet pickling were studied, and analyzed by centrifugal loss rate, thiobarbituric reactive substances (TBARs), dodecyl sulfate Sodium dodecyl sulfate polyacrylamide gel electrophoresis (SDS-PAGE), scanning electron microscope (SEM), transmission electron microscopy (TEM), Fourier infrared and low-field nuclear magnetic resonance. Our results showed that: 1) the crude protein content of grass carp decreased by 2%,

基金项目: 国家重点研发计划资助(2019YFD0902003); 2019年上海市科技兴农重点攻关项目: “鲜活水产品物流过程中品质监控和违法添加物快速检测技术研究(2019-02-08-00-10-F01143)”

第一作者简介: 姜晶丹(1994-) (ORCID: 0000-0001-9234-5206), 女, 硕士研究生, 研究方向为水产品加工, Email: 1030278454@qq.com。

*通讯作者简介: 卢瑛(1971-) (ORCID: 0000-0003-1001-8995), 女, 教授, 博士, 硕士生导师, 研究方向为食品生物技术, E-mail: y-lu@shou.edu.cn。

the centrifugal loss rate decreased by 8%, and the TBARs value increased by 2 times when salt concentration increased from 3% to 12%. 2) Based on the low-field nuclear magnetic resonance analysis data, it was found that the bound water and free water in the fish tissue were converted into non-flowable water with the increasing of the salt concentration. 3) The second-derivative infrared spectrum results showed that the peak intensity of 1747 cm^{-1} significantly reduced after pickling, and the peak intensity ranging between 1612-1698 cm^{-1} and 1523-1553 cm^{-1} significantly increased at a salt concentration of 3%. The peak intensity gradually decreased with the increasing of salt concentration. 4) SEM and TEM results showed that the muscle fibers of fish meat became blurred at 3% salt concentration, but the sarcoplasmic tissue remained intact. The morphology of sarcoplasm became loose at 12% salt concentration. 5) 12% salt concentration would destroy the spatial structure of fish protein, thus making fish tissue loose, increasing water loss, and reducing the edible quality of fish meat. However, 3% salt concentration had the smallest effects on fish meat texture. Our study can provide scientific basis for the development of high quality and convenient aquatic products in the future.

Key words: wet pickling; salt concentration; grass carp; quality; muscle tissue; texture

中图分类号: TS254.1 文献标志码: A

DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20200226-298

草鱼是我国主要淡水养殖鱼种之一, 有较高的营养价值^[1], 深受人们欢迎。在我国, 草鱼产量常年稳居养殖鱼类首位, 2018 年达到 534.56 万吨^[2]。目前, 草鱼除鲜活销售之外, 大多是经企业加工后再销售, 但是因企业使用的传统生产技术存在生产效率低和产品竞争力不足等缺点^[3], 使得企业淡水鱼产业的加工率低^[2]。因此, 草鱼的加工技术和生产方式亟待改进, 以迎合消费者对安全、卫生、健康产品的需求, 并实现规模化生产。

腌制是我国水产品加工的传统方法之一, 腌制产品广受消费者喜爱^[4]。食盐腌制作为最基本的腌制方法主要分为干腌法, 湿腌法和混合腌制法, 干腌虽然操作简便, 但腌制时间长且易造成腌制产品品质下降, 混合腌制法因其生产工艺复杂, 运用不多, 而湿腌法虽然劳动量相较于干腌法大, 但其可缩短腌制时间, 且产品肉质柔软, 在水产品腌制加工中广泛运用^[5]。目前国内外关于湿腌鱼类的研究大多是关于渗透动力学^{[6][7]}和鱼类蛋白质的氧化机制^{[8][11]}, 水产品在湿腌过程中鱼肉组织内部和盐溶液间发生一系列运动, 除水分和氯化钠的相互传质外, 还包括蛋白质、脂肪等物质的变化^[12], 而在腌制过程中蛋白质、脂肪等的变化对水产品营养品质和质构的影响研究仍较少^[13], 因此, 研究肌肉组织在湿腌过程中发生的质构或者品质变化及其原因, 对于改善湿腌产品品质、开发健康的方便水产品具有重要的意义。本文以草鱼为原料, 探究盐浓度 (3%, 6%, 9%, 12%) 对鱼肉肌肉蛋白质、水分、脂肪和肌肉组织结构和质构的影响, 以期对营养、高品质方便水产制品的开发提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与amp;仪器

1.1.1 材料与amp;试剂

鲜活草鱼: 购于上海市浦东新区芦潮港, 规格为 1.5kg~2kg/条, 致死方式为二氧化碳窒息; 食盐: 购于农工商超市。

浓硫酸、盐酸: 分析纯, 国药集团化学试剂有限公司; 硫酸钾、硫酸铜、石油醚、 β -巯基乙醇: 分析纯, 麦克林生化科技有限公司; R-250 考马斯亮蓝染色液、2 \times 上样缓冲液 (Loading Buffer)、十二烷基硫酸钠、Tris: 分析纯, 生工生物有限公司; 蛋白质 Marker (10kDa-200 kDa): 碧云天生物技术。

1.1.2 主要仪器设备

DHG-9053A 鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; PL2002 电子天平, 瑞士梅特勒-托利

多仪器(上海)有限公司; IKA T10 匀浆机, 上海楚柏实验室设备有限公司; Z36HK 高速冷冻离心机, 德国 Hermle 公司; TA.XT plus 物性测试仪, 超技仪器有限公司; FOSS Kjelttec 8400 全自动凯氏定氮仪, 上海瑞国际芬贸易有限公司; FOSS Soxtec 2050 全自动索氏脂肪浸提仪, 上海瑞国际芬贸易有限公司; TS-8 脱色摇床, 江苏海门其林贝尔仪器制造有限公司; Meso MR23-060H-I 低场核磁共振仪, 上海纽迈电子科技有限公司; Spotlight 400 傅立叶变换红外光谱仪, 珀金埃尔默仪器(上海)有限公司

1.2 方法

原料处理: 新鲜草鱼, 一整条装袋, 袋中装水, 水中充二氧化碳气体直至活鱼死亡, 去鳞、去头、去骨、去内脏, 流水洗净, 切块称重, 随机分成五组, 每组 5 块。采用湿腌法进行腌制, 盐浓度分别为 3%, 6%, 9%, 12%, 腌制温度为 4℃, 腌制时间 30min, 新鲜鱼作为对照 (C)。

1.2.1 营养成分测定

针对鱼肌肉组织样品, 采用 GB 5009-5-2016 中的凯氏定氮法测定粗蛋白, 采用 GB 5009-6-2016 中的索氏抽提法测定粗脂肪。

1.2.2 离心损失率测定

根据 Jiang^[14]的方法, 稍作修改。将样品切块 (1cm×1cm×0.5cm), 称重 W_0 于离心管中, 在离心管底部放入吸水纸, 以 8000 r/min 离心 20min, 称取离心后样品的重量 W_1 。通过公式计算离心损失

$$\text{率: 离心损失率 (\%)} = \frac{(w_0 - w_1)}{w_0} \times 100$$

式中: W_0 : 离心前样品重量; W_1 : 离心后样品重量。

1.2.3 硫代巴比妥酸值

参考包建强^[15]的方法, 稍作修改。准确称取搅碎的鱼肉 5.00g 加入 25mL 20%的三氯乙酸, 匀浆后 4℃静置 1 h, 以 8000 r/min 离心 10 min, 过滤后蒸馏水定容至 50 mL, 取滤液 5 mL, 加入 0.02 M 的 TBA 溶液 5 mL 混匀后, 沸水浴 20 min, 冷却至室温后在 532 nm 处测吸光度。空白对照以 5 mL 20%三氯乙酸代替 5 mL 滤液。每个样品三个平行, 结果以 mg/100g 表示。

1.2.4 十二烷基硫酸钠聚丙烯酰胺凝胶电泳 (SDS-PAGE)

参考 Shi^[16]的方法, 稍作修改。称取 3g 样品, 加入 27 mL 溶解液 (5% SDS, 0.1%) 匀浆, 80℃水浴 1 h 后, 8000 r/min 离心 20min, 上清液过滤后测定蛋白质浓度, 将上清液稀释至 1 mg/mL 蛋白浓度。将处理好的蛋白质样品与 SDS-PAGE 样品缓冲液 1:1 混合, 沸水浴 5 min。电泳时, 采用 5%浓缩胶和 10%分离胶制成的聚丙烯酰胺凝胶, 样品量为 8 μ L。设置电源电压进行跑胶, 待电泳结束后取出, 染色 1 h, 脱色至蛋白质条带清晰。

1.2.5 质构参数

取草鱼背肉切成 3cm×2cm×1cm 块状, 使用质构仪 TA.XT Plus 进行 TPA 测试, 对草鱼的硬度、弹性和咀嚼性进行测定。设定参数: 探头型号 P50, 触发力 5g, 测试速率为 1 mm/s, 最后结果为 6 次试验平行结果的平均值。

1.2.6 低场核磁共振分析

参考卞瑞姣等人^[17]的方法, 稍作修改。取 3 cm×1 cm×1 cm 的鱼块, 每个样品取三个平行。采用 MesoMR70 核磁共振成像分析仪进行测定, 共振频率 23.143 MHz, 磁体强度 0.54T, 线圈直径为 70 mm, 磁体温度为 32℃。

T_2 测试参数: $P_1=20$ us, $P_2=36$ us, $TW=2000$ ms, $TE=0.4$ ms, $NECH=4000$, $NS=4$, $SW=200$ kHz。使用核磁共振分析测量软件及 CPMG 序列采集样品信号, 采用 SIRT 1000000 进行反演。

1.2.7 电镜微观结构分析

SEM 样品: 将草鱼鱼片切成 $3\text{mm}\times 3\text{mm}\times 2\text{mm}$ 大小, 用 2.5%戊二醛 4°C 固定 24 小时, 接着用磷酸缓冲液漂洗样品, 然后用乙醇溶液和甲醛进行梯度沉淀, 最后将处理好的样品进行冷冻干燥, 喷金后进行观察。

TEM 样品: 将用磷酸盐漂洗的样品, 用乙醇和丙酮溶液梯度洗脱后, 再用四氧化钨固定后进行观察。

1.2.8 红外光谱数据采集

原始光谱采集: 取 5g 鱼肉搅碎成鱼糜状, 冷冻干燥 24 h 除去水分, 之后将其与溴化钾碎晶按 1:100 混合研磨充分后, 用傅里叶红外光谱仪进行光谱采集, 波数范围为 $4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$, 分辨率为 4 cm^{-1} , 光谱累加 32 次。

二阶导数谱图: 将原始光谱图用谱图处理软件 PerkinElmer Spectrum (Version10.4.3) 进行基线校正、13 点多项式最小二乘法平滑处理得到样品的二阶导数谱图。

1.3 数据分析

采用 SPSS 20.0、单因素方差分析 (ANOVA) 对数据进行统计分析, 并用 Excel 制图。

2 结果与分析

2.1 湿腌对草鱼肌肉蛋白质的影响

蛋白质是组成鱼类肌肉的主要成分, 淡水鱼肌肉中粗蛋白含量一般在 15%-22%, 而草鱼的蛋白质含量大致在 18%左右^[5]。鱼类肌肉蛋白质可分为肌原纤维蛋白, 肌浆蛋白和肌基质蛋白三大类, 而肌原纤维蛋白占肌肉蛋白总量的 50%以上^[18]。目前有许多研究发现腌制会引起肌肉蛋白质的降解和聚集^[19], 导致蛋白质变性。从图 1 可以看出, 在湿腌过程中, 当盐浓度为 3%时, 草鱼蛋白质含量没有发生变化, 当盐浓度逐渐增加时, 粗蛋白含量逐渐降低, 说明草鱼蛋白质有流失, 此结果与郝子娜^[20]鲈鱼腌制加工结果相一致。从图 2 可以看出, 3%盐浓度腌制草鱼肉中的蛋白质条带的数量和强度与新鲜草鱼的样品最接近, 表明 3%的盐浓度对草鱼肌肉蛋白质影响不大; 当盐浓度达到 12%时, 鱼肉组织中的肌球蛋白和肌动蛋白条带变细, 且强度变弱, 表明蛋白质的含量减少了, 其可能是蛋白质流失或降解导致的。随着盐浓度的增加, 蛋白质含量明显下降, 可能是钠离子和带相反电荷的蛋白质基团相互作用, 从而形成了一个离子双电层, 降低了蛋白质分子间的静电相互作用, 导致蛋白质的水化^[21]。张蕊^[22]研究发现在盐离子溶液中蛋白形态会发生改变, 主要是蛋白二级、三级和形态因子的改变, 从而导致蛋白构象的改变, 致使蛋白发生变性, 变得更易流失。

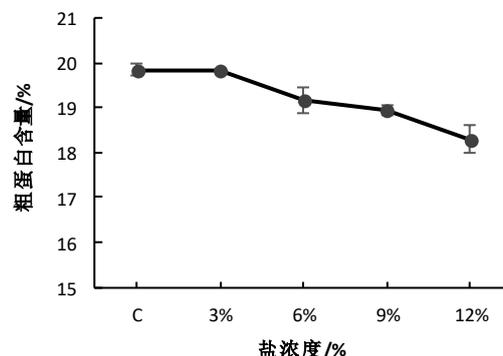


图 1 不同盐浓度下鱼肉粗蛋白含量. C 为新鲜鱼肉, 作为对照样品

Fig.1 Crude protein content of fish at different salt concentrations. C is fresh fish, as a control sample

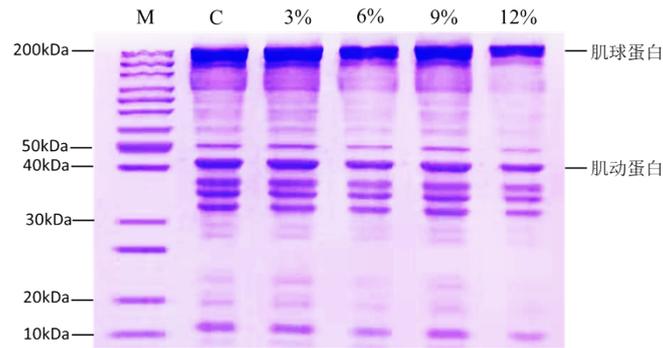


图2 不同盐浓度下草鱼肌肉的 SDS-PAGE. M 为 Marker; C 为新鲜鱼肉, 作为对照样品

Fig.2 SDS-PAGE of grass carp muscle at different salt concentrations. M is Marker; C is fresh fish meat, as a control sample

2.2 湿腌对水分的影响

鱼肉的持水能力被认为与蛋白质性质和组织微观结构密切相关, 尤其是肌纤维的膨胀^{[23][24]}。如图3所示, 3%盐浓度的离心损失率最高, 其后随着盐浓度的增加离心损失率逐渐下降, 表明随着盐浓度增加, 草鱼肌肉的持水能力是下降的。食盐会增强水的极化作用, 使得蛋白质周围的双电层厚度发生变化, 从而影响蛋白质的稳定性^[18]。在低盐浓度下, 蛋白质表面的双电层厚度增加, 蛋白质的持水性加大, 当盐浓度加大时, 蛋白质表面的双电层厚度减少, 蛋白质的稳定性降低, 从而使得蛋白质发生流失。

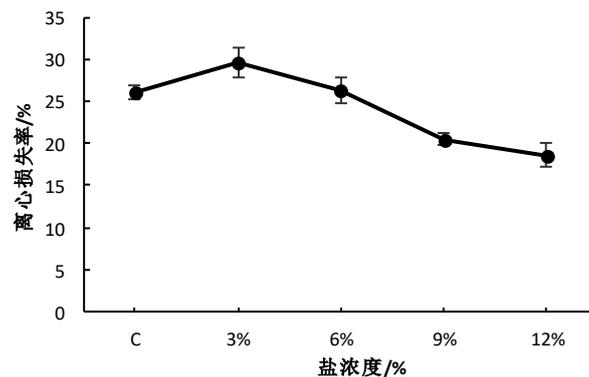


图3 不同盐浓度下草鱼肌肉离心损失率变化

Fig.3 Centrifugal loss rate of grass carp muscle under different salt concentrations

在草鱼腌制过程中, 由于盐类会和氨基酸侧链基团竞争水分子, 因此湿腌溶液的盐离子强度会对存在于蛋白质网络结构中的不易流动水、自由水以及结合水的状态产生影响, 从而导致鱼肉质构发生变化。因此通过低场核磁共振技术对鱼肉水分变化进行分析。图4是低场核磁共振测定的不同盐浓度腌制的草鱼 T_2 横向弛豫时间图谱。弛豫时间的变化表征不同腌制盐浓度下不同水分的迁移情况, 即不同状态下水分的结合状态和迁移程度, 而峰面积代表着不同状态水的含量。从图中可以看出, 草鱼共产生了3个峰, 分别对应3种水分相态, 即结合水 T_{21} (0.01-10 ms), 不易流动水 T_{22} (10-100 ms) 和自由水 T_{23} (>100 ms)。由图可见, 3%盐浓度(图4, 绿色)和6%(图4, 紫色)盐浓度腌制的草鱼, 其肌肉组织中不易流动水含量最高。结合峰总面积及相应组分所占总水分的百分比(表1), 与新鲜草鱼相比, 随着盐浓度增加, 草鱼的 $A_{总}$ 总体下降, 说明草鱼水分含量是逐渐下降的。同时腌制浓度的增加, 结合水 S_{21} 和自由水 S_{23} 比例呈减小的趋势, 而不易流动水 S_{22} 比例增大, 表明腌制处理使得部分结合水与自由水转化为不易流动水。此结果与卞瑞姣^[17]的研究结果相一致。

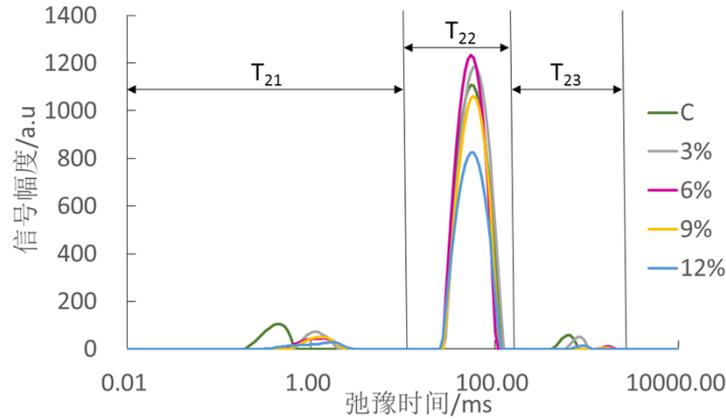


图4 不同盐浓度下腌制草鱼的T2弛豫图谱

Fig.4 T2 relaxation spectra of pickled grass carp under different salt concentrations

表1 总水分面积及相应组分所占总水分的百分比

Table 1 Total water area and percentage of total water content of corresponding components

盐浓度/%	A _总	S ₂₁ /%	S ₂₂ /%	S ₂₃ /%
C (0%)	16653±138 ^d	6.74±0.12 ^a	91.29±0.67 ^a	1.97±0.12 ^d
3	17015±122 ^c	4.25±0.23 ^b	94.20±0.85 ^b	1.55±0.10 ^c
6	16139±187 ^c	3.98±0.10 ^b	95.75±0.88 ^c	0.27±0.01 ^a
9	14341±109 ^b	4.23±0.28 ^b	95.61±0.75 ^{bc}	0.16±0.02 ^a
12	11686±174 ^a	4.11±0.32 ^b	95.32±0.45 ^{bc}	0.57±0.01 ^b

注：同列不同字母表示差异显著 (P<0.05)

由于低盐处理后草鱼肌肉的粗蛋白和水分变化不明显，但是高浓度盐处理后的草鱼蛋白质和水分发生了明显变化，因此进一步对比分析了3%和12%盐浓度下的草鱼肌肉显微结构。结果如图5所示，未处理草鱼肌肉组织呈现清晰的多层重叠结构 (SEM, A图)，且粗丝和细丝有规律地交替排列而成的肌原纤维和肌浆亦清晰可见 (TEM, A图和a图)。经3%浓度湿腌后的肌肉组织，多层次状结构变薄、相互连接形成片状 (SEM, B图和b图)，且观察不到粗丝和细丝，肌原纤维组织变模糊，肌浆团聚状的嵌在肌肉中 (TEM, B图和b图)。当鱼经12%盐浓度进行湿腌后，肌肉组织的多层次状完全消失，呈现片状外形 (SEM, C图)，且肌浆裂解、缩小 (TEM, C图和c图)。这可能是肌肉组织细胞在低盐浓度下，渗透压小，蛋白质的水化能力增强，所以组织细胞吸收水分，导致纤维细胞内粗丝和细丝膨胀，细胞间的间隔变小从而连接形成片状外观。但在高盐度下，水分子和盐离子之间的相互作用强烈，因而引起蛋白质脱水，组织细胞彻底被破坏，肌浆裂解而水分发生流失。

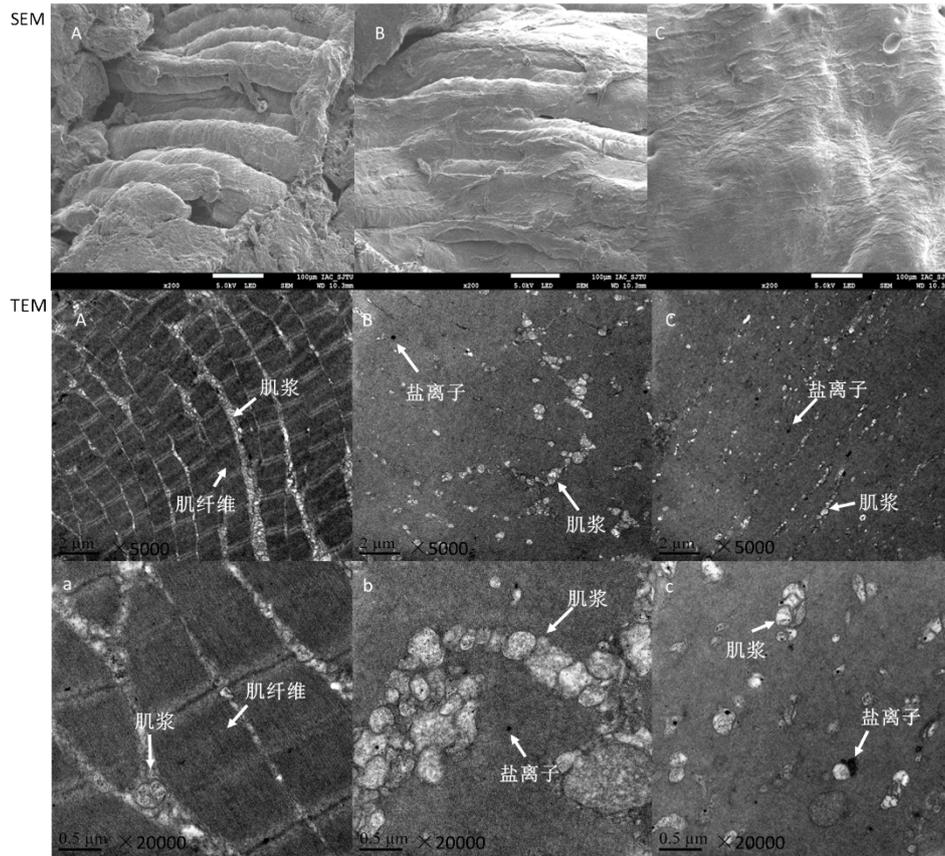


图5 湿腌草鱼肌肉的SEM和TEM组织微观结构

SEM:A、B和C为×200新鲜草鱼、3%和12%浓度腌制草鱼肌肉；TEM：A、B和C分别为×5000新鲜草鱼、3%和12%浓度腌制草鱼肌肉，a、b和c分别为×20000新鲜草鱼、3%和12%浓度腌制草鱼肌肉

Fig.5 SEM and TEM microstructure of wet pickled grass carp muscle

SEM: A, B, and C are ×200 fresh grass carp, 3% and 12% salted grass carp muscle; TEM: A, B, and C are ×5000 fresh grass carp, 3% and 12% salted grass carp muscle, a, B and c are ×20000 fresh grass carp, 3% and 12% marinated grass carp muscle respectively

2.3 湿腌对脂肪的影响

TBARs 值是不饱和脂肪酸氧化分解所产生的衍生物如丙二醛（MDA）等与硫代巴比妥酸反应的结果，TBARs 值的高低表示氧化最终生成物的多少。从图 6 中可以看出，随着盐浓度的增加，TBARs 值逐渐上升。低盐浓度（3%）对 TBARs 值没有影响，随着盐浓度的增加，TBARs 值呈现明显的增加趋势，表明盐浓度越高，草鱼脂肪氧化的速度越快。与之相反，草鱼的粗脂肪含量随着盐浓度增加而逐渐下降。腌制过程中脂肪氧化的可能是由于自身内源性酶活引起的，也可能是湿腌处理加速了肌肉脂肪的氧化^[25]。有研究表明^[26]肌肉中 TBARs 值在 0.5-1.0 mg/kg 之间不会发生明显的腐败，由于腌制时间为 30 min，即使是高盐腌制，草鱼的 TBARs 值只有 0.198 mg/100g，由此可见，短暂的湿腌处理对鱼肉风味的影响是比较小的。

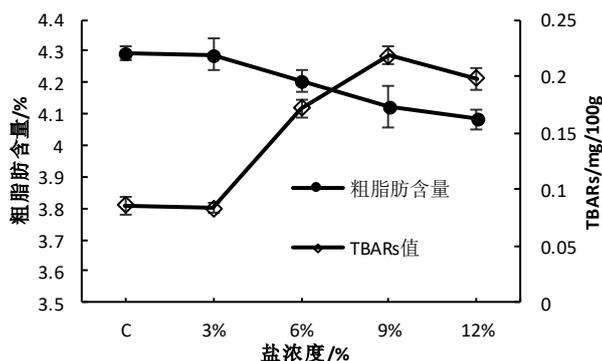
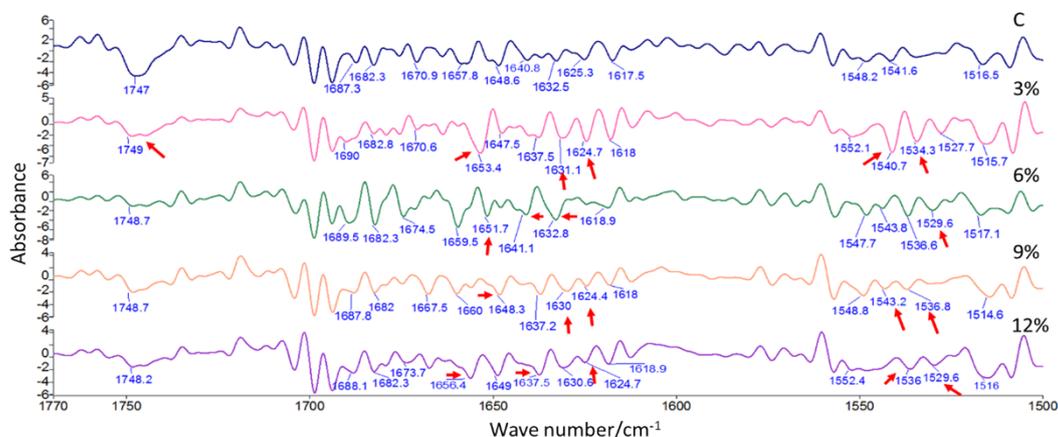


图6 不同盐浓度下草鱼脂肪含量及TBARs值变化

Fig.6 Changes in fat content and TBARs value of grass carp under different salt concentrations

红外光谱是分子振动能级的吸收光谱,任何官能团都有红外吸收,因此红外光谱可以反映样品化学成分的综合信息^[27]。鱼肉蛋白质的酰胺 I 带, II 带红外光谱特征峰区域分别为 $1612-1698\text{ cm}^{-1}$ 和 $1523-1553\text{ cm}^{-1}$ 。二阶导数红外光谱可将原谱中重叠峰进行分离,增强光谱的表现分辨率,从而提高图谱的指纹特征性并获得特定化合物的特征峰^[28]。由图 7 可以看出,相较于未腌制样品(图 7, C), 1653 cm^{-1} 、 1631 cm^{-1} 、 1625 cm^{-1} 、 1541 cm^{-1} 、 1534 cm^{-1} 峰面积在 3% 浓度时增加,但随着盐浓度增加,这些峰的波长出现位移,且面积变小。这可能是盐离子夺取水分子从而使得蛋白质的 N-H, C-N 键暴露出来,而当盐浓度逐渐增加后,部分 N-H, C-N 键可能遭到破坏,从而造成这些吸收峰的强度逐渐减弱或发生位移。湿腌后 1747 cm^{-1} 处吸收峰(主要归属于脂类物质的 C=O 伸缩振动吸收)的减弱,很可能是腌制引起脂肪的氧化从而造成脂肪的减少,此结果和 TBARs 值的分析结果相一致。

图7 不同盐浓度腌制鱼 1770-1500 cm^{-1} 二阶导数光谱图Fig.7 Second derivative spectra of 1770-1500 cm^{-1} salted fish with different salt concentrations

2.4 湿腌对草鱼质构变化的影响

质构特性是鱼肉最重要的特征之一^[29]。一般而言,肌纤维越粗、结构越致密则所需的咀嚼力越大,而弹性和硬度则受肌肉的持水性、微观结构的破坏程度影响较大。由于食盐影响整个腌制过程的渗透压,改变蛋白质与水分子之间的相互作用和肌肉组织结构,本研究发现 12% 盐浓度的硬度、弹性和咀嚼性都是最低的(表 2),表明高浓度的盐对草鱼肌肉的品质影响比较大,这和该浓度下其蛋白质、脂肪、水分以及肌肉组织微观结构的变化最大是相一致的。离心损失率结果(图 3)显示 3% 盐浓度的持水性能比较好,而肌肉组织的微观结构(图 5)显示 3% 盐浓度对肌肉组织结构破坏比较小,质构分析也发现 3% 盐浓度的弹性和咀嚼性最高(表 2)。由此可见,湿腌过程中,高盐浓度对草鱼肉质构变化具有较大影响,胡晓飞等人的研究也发现高盐导致肌肉组织状态变化大,硬度下降,

和我们的结果一致 Error! Reference source not found.。综合营养成分、肌肉组织结构和鱼肉的质构数据，我们发现低盐腌制对草鱼肌肉组织结构的影响比较小，其食用品质和未腌制鱼肉最为接近。

表 2 不同盐浓度腌制草鱼的质构变化

Table 2 Texture changes of salted grass carp with different salt concentrations

分类	C	3%	6%	9%	12%
硬度/g	29726±1596 ^b	21432±747 ^a	19340±1963 ^a	20822±2619 ^a	19043±2174 ^a
弹性/mm	0.48±0.03 ^b	0.62±0.06 ^c	0.36±0.01 ^a	0.35±0.02 ^a	0.33±0.01 ^a
咀嚼性/mJ	3578±82 ^c	3631±456 ^c	2683±174 ^b	2462±301 ^b	1720±114 ^a

注：同行不同小写字母表示差异显著（ $P<0.05$ ）

3 结论

草鱼在湿腌过程中，盐浓度对草鱼蛋白质和质构的影响均较显著。湿腌处理引起草鱼肌肉的蛋白质和脂质的官能团发生变化，使得草鱼肌肉结构变松散，蛋白质、水分流失，脂肪发生氧化，鱼肉品质下降。3%盐溶液的湿腌草鱼，其肌肉的蛋白质、水分和脂肪变化很小，腌制后的鱼肉弹性和咀嚼性增加，说明低盐腌制的草鱼的营养成分损失少，口感佳，可用于营养方便水产制品的开发。

参考文献:

- [1] 楼明,蒋予箭.脆香草鱼片研制[J]. 广州食品工业科技, 2000(1): 7-8; DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2000.01.004
- [2] 中华人民共和国农业部编.中国渔业统计年鉴 2018[M]. 北京:中国农业出版社, 2019.
- [3] 姜松,赵杰文. 食品物性学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2016: 36-78.
- [4] 章银良,夏文水. 腌鱼产品加工技术与理论研究进展[J]. 中国农学通报,2007(03):116-120.
- [5] 夏文水,罗永康,熊善柏等.大宗淡水鱼贮运保鲜与加工技术[M]. 北京:中国农业出版社,2014.
- [6] MINH VAN NGUYEN, SIGURJON ARASON, KRISTIN ANNA THORARINSDOTTIR, et al. Influence of salt concentration on the salting kinetics of cod loin (*Gadus morhua*) during brine salting[J]. *Journal of Food Engineering*.2010, 100:225–231. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2010.04.003
- [7] L. GALLART-JORNET, J.M. BARAT, T. RUSTAD, et al. A comparative study of brine salting of Atlantic cod (*Gadus morhua*) and Atlantic salmon (*Salmo salar*) [J].*Science Direct*.2007,79: 261–270. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2006.01.053
- [8] Yang J, Xiong Y L.Comparative time— course of lipid and myofibrillar protein oxidation in different biphasic systems under hydroxyl radical stress [J] .*Food Chemistry*, 2018, 243:231—238. DOI: 10.1016/j.foodchem.2017.09.146
- [9] Oueslati K, Pomélie D D L, Santé— Lhoutellier V, et al.Impact of the Fenton process in meat digestion as assessed using an in vitro, gastro— intestinal model [J] .*Food Chemistry*, 2016, 209:43. DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.04.041
- [10] 姜晴晴, 鲁璐, 胡玥, 等 .羟基自由基氧化体系对带鱼蛋白理化性质的影响 [J] .*现代食品科技*, 2015, 31(5): 116—123. DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.5.019
- [11] 刘娟, 田童童, 童军茂, 等 .蛋白质氧化对白斑狗鱼肌肉蛋白理化性质变化的影响 [J] .*食品工业*, 2016, 37(4): 46—50.
- [12] 付 丽,雪梨,申晓琳等.牛肉湿腌及超声波辅助湿腌过程中腌制液渗透速率的研究[J]. *食品科技*,2019,44 (4) : 104-109. DOI: 10.13684/j.cnki.spkj.2019.04.020
- [13] 李学鹏,刘慈坤,王金厢等. 水产品贮藏加工中的蛋白质氧化对其结构性质及品质的影响研究进展[J]. *食品工业科技*, 2019,40(18):319-325+333. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2019.18.051
- [14] QINGQING JIANG,NAHO NAKAZAWA,YAQIN HU, et.al.Microstructural modification and its effect on the quality attributes of frozen-thawed gigeeye tuna(*Thunnus obesus*) meat during salting[J].*LWT-Food Science and Technology*.2019,100:213-219. DOI: 10.1016/j.lwt.2018.10.070
- [15] 包建强,路昊,岳晓华等.冻藏期间金枪鱼的 TVB-N、脂肪氧化、pH 的值变化 [C] .上海市制冷学会 2005 年学术年会论文集,上海,2005.
- [16] SHI Y, LI R-Y, TU Z-C, et al. HUANG, X.-Q.; HE, N. Effect of gamma-irradiation on the physicochemical properties and structure of fish myofibrillar proteins [J].*radiation physics and chemistry*. 2015, 109, 70–72 DOI: 10.1016/j.radphyschem.2014.12.016
- [17] 卞瑞姣,曹荣,赵玲等.基于低场核磁共振技术检测秋刀鱼腌干制过程水分状态变化[J].*食品安全质量检测学报*, 2017,8 (5) :1698-1703. DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2017.05.029
- [18] 曾洁,陈福玉,于小磊等.烹饪化学[M].北京:化学工业出版社,2018.
- [19] SANNAVEERAPPA T,AMMU K,JOSEPH J.Protein-related changes during salting of milkfish(*Chanos chanos*)[J].*Journal of the Science of Food and Agriculture*,2003,84:863-869. DOI: 10.1002/jsfa.1682
- [20] 郝子娜,李振兴,王甜甜等.一卤鲜鲈鱼加工过程中蛋白质降解的分析[J].*食品工业科技*,2015,36 (19) :68-72+77. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2015.19.005
- [21] BALDWIN R L. How Hofmeister ion interactions affect protein stability[J]. *Biophysical Journal*, 1996, 71(4):2056. DOI: 10.1016/S0006-3495(96)79404-3
- [22] 张蕊. pH 和盐对秘鲁鲉鱼肌原纤维蛋白溶解度和构象变化的研究[D].2016
- [23] JIANG QQ, NAKAZAWA,N, HU YQ,et al. Changes in quality properties and tissue histology of lightly salted tuna meat subjected to multiple freeze-thaw cycles[J]. *Food Chemistry*, 2019,(271):550–560. DOI: 10.1016/j.foodchem.2019.04.091

- [24] NGUYEN M. V, THORARINSDOTTIR K. A, GUDMUNDSDOTTIR, A, et al. The effects of salt concentration on conformational changes in cod (*Gadus morhua*) proteins during brine salting[J]. Food Chemistry, 2011,125(3):1013-1019. DOI: 10.1016/j.foodchem.2010.09.109
- [25] NATALIA P. VIDAL, ENCARNACIÓN GOICOECHEA, MARÍA J. MANZANOS, et al. H-1 NMR study of the changes in brine- and dry-salted sea bass lipids under thermo-oxidative conditions: Both salting methods reduce oxidative stability [J]. European journal of lipid science and technology. 2015, 117, 440-449. DOI: 10.1002/ejlt.201400329
- [26] 蔡秋杏,吴燕燕,李来好等. 黄花鱼腌制加工过程的脂肪氧化分析[J]. 食品安全质量检测学报,2014,5(12):4079-4084. DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2014.12.056
- [27] XU R, SUN S, ZHU W, et al. Multi-step infrared macro-fingerprint features of ethanol extracts from different *Cistanche* species in China combined with HPLC fingerprint[J]. Journal of Molecular Structure, 2014, 1069: 236-244. DOI: 10.1016/j.molstruc.2014.03.061
- [28] 马芳,张方,汤进等.不同产地茯苓皮药材红外光谱的识别[J]. 光谱学与光谱分析,2014,34(2): 376-380.
- [29] 熊舟翼,卢素芳,徐洪亮,雷跃磊,魏辉杰,刘怡然.熟制工艺对武昌鱼风味、品质及质构特性的影响[J].湖北农业科学, 2019,58(22):168-178. DOI: 10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2019.22.040
- [30] 胡晓飞,林洪,隋建新,曹立民.食盐浓度对即热型多宝鱼食用品质的影响[J].食品科技,2018,43(07):261-269. DOI: 10.13684/j.cnki.spkj.2018.07.046