



超声联合乙酸酥化草鱼骨的工艺及酥骨机制

张伊涵¹, 马华威², 罗永康¹, 谭雨青¹, 洪惠^{1*}

(1. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083;

2. 农业农村部中国(广西)-东盟水产种质资源综合开发与利用重点实验室,

广西壮族自治区水产科学研究院, 广西南宁 530021)

摘要: 即食淡水鱼制品中经常存在坚硬的鱼骨, 一方面可能刺破包装使产品漏油、腐败, 另一方面可能在食用时刺伤口腔和食道, 存在物理性食品安全风险。为了解决即食淡水鱼制品的鱼骨酥化问题, 本研究开发了超声联合乙酸处理的草鱼骨酥化技术, 设计了一种适用于即食淡水鱼制品的酥骨率评价方法, 根据酥骨率与鱼肉品质指标筛选出最佳的酥骨工艺条件, 并探究其鱼骨酥化机制。草鱼块经超声联合乙酸处理、腌制、油炸、真空包装、高温灭菌制成酥骨草鱼块, 通过感官特性、pH值、色泽与肌肉组织结构评价其品质。通过对鱼骨标准样品的感官评价与质构分析, 建立酥骨率评价方法, 评价酥骨草鱼块的酥骨率, 得到最佳的超声联合乙酸处理工艺条件。最后采用扫描电子显微镜观察和傅里叶红外光谱分析鱼骨酥化机制。结果显示, 研究建立的酥骨率评价方法可以简便、客观地评价即食草鱼制品中鱼骨酥化程度。经酥骨率评价、感官评价以及其他品质指标分析, 效果最佳的酥骨工艺条件为: 乙酸浓度 1.2% (体积比), 超声功率 120 W, 处理时间 45 min, 该条件下获得的鱼块的酥骨率、色泽、质地、滋味均较好。扫描电子显微镜观察与傅里叶红外光谱结果表明, 最佳工艺条件下的超声联合乙酸处理可以削弱胶原蛋白与羟基磷灰石之间的结合, 促使羟基磷灰石逸出, 后续的热处理也可能进一步破坏胶原蛋白的三螺旋结构, 使鱼骨的硬度和韧性下降。研究表明, 适当条件的超声联合乙酸处理可以破坏鱼骨原本结构, 在不影响产品品质的前提下实现草鱼鱼骨的酥化。本研究可为淡水鱼酥骨技术研发提供思路, 为即食酥骨鱼制品的开发提供理论支持。

关键词: 草鱼; 鱼骨; 酥骨技术; 超声技术; 乙酸

中图分类号: S 985; TS 254.4

文献标志码: A

2022年, 中国淡水鱼总产量达 2 800.31 万 t, 占国内鱼类总产量的 77.04%^[1]。近年来, 在即食休闲食品市场迅速增长的背景下, 即食淡水鱼制品发展出鱼糜制品、真空包装调味鱼块、鱼脯等多种类型, 其中真空包装调味鱼块是即食淡水鱼制品中的主流产品之一。然而, 一项针对线上销

售的真空包装调味鱼块的消费者评价调研发现^[2], 有 18% 的产品出现包装破损漏油的问题, 另有 15% 的产品被认为鱼刺多且酥骨不到位, 尤其是以酥骨为宣传点的产品中也存在坚硬的鱼骨。坚硬的鱼骨在产品的运输过程中容易因为相互挤压将包装刺破, 使产品出现漏油和腐败变质等问题,

收稿日期: 2024-04-05 修回日期: 2024-05-13

资助项目: 国家重点研发计划 (2022YFD2100902); 国家现代农业产业技术体系 (CARS-45)

第一作者: 张伊涵 (照片), 从事水产品加工研究, E-mail: zhangyihanhuihua@163.com

通信作者: 洪惠, 从事水产品加工及贮藏工程研究, E-mail: lhong@cau.edu.cn



是造成真空包装调味鱼块在运输中损耗率较高的主要原因。同时, 存在于产品中的鱼骨具有较大的食品安全隐患, 包括在食用时刺伤食道、损伤脏器^[3-5]。总而言之, 即食淡水鱼制品的鱼骨酥化这一关键技术问题阻碍了产业的发展, 无论是从产品的生产、贮运角度, 还是从食品安全角度, 淡水鱼的酥骨问题都亟需解决。

与海水鱼相比, 淡水鱼的鱼骨硬度更高, 酥骨难度更大。有机酸可以软化鱼骨, 有研究发现低浓度乙酸处理可以软化鲢 (*Hypophthalmichthys molitrix*) 鱼片内的肌间刺, 且对鱼片的质地和风味没有显著影响^[6]。Shimosaka^[7]发现乙酸处理联合加热处理使鱼骨中胶原蛋白溶出, 鱼骨结构发生变化, 硬度下降。有机酸处理是一种较为方便、低成本的鱼骨酥化方法, 但在感官可接受的浓度下, 有机酸处理效果有限, 需要联合其他技术达到较好的鱼骨酥化效果。超声处理是用于提取鱼骨中钙和胶原蛋白的手段之一。超声处理能够使鱼骨中羟基磷灰石的晶体结构被破坏, 矿化胶原纤维的三螺旋结构松动, 胶原蛋白中的氢键减少, 促进羟基磷灰石晶体的逸出^[8-9]。同时超声处理具有辅助腌制的作用, 可以促进腌制液中的有机酸向鱼肉中渗透^[10], 提升有机酸的酥骨效果。本研究以草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*) 为原料建立了超声联合乙酸处理的草鱼骨酥化技术, 设计了一种适用于即食淡水鱼制品的酥骨率评价方法, 综合酥骨率与鱼肉品质指标筛选出最佳的酥骨工艺条件, 最后探究其鱼骨酥化机制, 旨在为淡水鱼酥骨技术的研发提供思路, 为即食酥骨鱼制品的开发提供理论支持。

1 材料与方 法

1.1 材料与试剂

35 条鲜活草鱼 [体重 (1.94±0.09) kg, 体长 (50.86±2.03) cm] 购买于北京四道口水鲜市场, 运输至实验室后暂养 1 h。将草鱼击晕、刮鳞、去除内脏, 于 -20 °C 冷冻待用。草鱼处理的整个过程遵循了中华人民共和国科学技术部 2006 年制订的《关于善待实验动物的指导性意见》和中华人民共和国国务院颁布的《实验动物管理条例 (2017 修订)》。食品级冰乙酸购于郑州康本生物科技有限公司; 无碘食盐购于中国盐业集团有限公司; 其他化学试剂购于北京索莱宝科技有限公司。

1.2 仪器与设备

CT3 质谱仪, 美国博勒飞有限公司; FE28 pH 计, 上海梅特勒-托利多仪器有限公司; 精密色差仪, 深圳三恩时有限公司; PQ001 低场核磁共振仪, 上海纽迈电子科技有限公司; KQ3200DE 数控超声仪, 昆山市超声仪器有限公司; Frontier 傅里叶红外光谱仪, 帕金埃尔默股份有限公司; SU3500 扫描电子显微镜, 北京日立科学仪器有限公司; D-1PF 真空冷冻干燥机, 北京德天佑科技发展有限公司。

1.3 实验方法

鱼块的处理 取包含肋骨的草鱼鱼排, 置于室温至半解冻状态, 沿肋骨的分布分割成 4 cm×2 cm 的小块, 每块鱼肉中包含 2 根肋骨 (下文中的鱼骨均指草鱼的肋骨)。在以乙酸浓度为影响因素的单因素实验中, 乙酸浓度选择 0%、0.6%、1.2%、1.8%、2.4% (体积比) (下文中简称 0%、0.6%、1.2%、1.8%、2.4% 乙酸组), 固定超声功率 120 W, 处理时间 45 min。在以超声功率为影响因素的单因素实验中, 超声功率选择 0、60、90、120 和 150 W (下文中简称 0 W、60 W、90 W、120 W、150 W 组), 固定乙酸浓度 1.2% (体积比), 处理时间 45 min。在以处理时间为影响因素的单因素实验中, 处理时间选择 15、30、45 和 60 min (下文中简称 15 min、30 min、45 min、60 min 组), 固定乙酸浓度 1.2% (体积比), 超声功率 120 W。对照组 (CK) 为不进行超声联合乙酸处理的样品。超声联合乙酸处理结束后, 所有样品使用 0.03 g/mL 食盐水腌制 2 h, 180 °C 油炸 5 min, 真空包装, 121 °C 灭菌 15 min, 获得不同工艺条件下的酥骨草鱼块样品。

鱼块的感官评价 酥骨草鱼块样品的感官评价由 12 人组成的感官评价小组完成 ($n=12$), 男女比例 1:1, 成员均经过培训, 感官评价方法如表 1 所示。

鱼块的 pH 值 参考汪之颖等^[11]的方法, 取酥骨草鱼块样品内部的鱼肉 3 g, 加入 27 mL 去离子水, 匀浆后用 pH 计测定鱼肉的 pH 值。

鱼块的色泽 首先用白板校正色差仪, 然后在室温下测定酥骨草鱼块表面的色泽。记录亮度 (L^*)、红度 (a^*) 和黄度 (b^*), 每组取 6 份平行 ($n=6$)。

肌肉微观结构观察 采用 H.E 石蜡切片染

表 1 酥骨草鱼块的感官评价标准

Tab. 1 Sensory evaluation criteria of the soft bone *C. idella* pieces

指标 index	8~10分 score 8-10	4~7分 score 4-7	1~3分 score 1-3
鱼骨酥化程度 fish bone softness	软, 无尖锐感或尖锐感很低, 容易咀嚼	较硬, 有一定尖锐感, 可以咀嚼	很硬, 尖锐感明显, 无法咀嚼
鱼肉酸度 sourness	基本品尝不出酸味或酸味不明显	有一定酸味、略刺激, 但可以接受	酸味明显、刺激, 酸度难以接受
色泽 color	金黄, 非常有吸引力	稍偏暗淡或偏焦黑, 比较有吸引力	暗淡或焦黑, 无吸引力
气味 smell	鱼香、油脂香明显, 无异味、蒸煮味或腥味	略有鱼香、油脂香, 略有异味、蒸煮味或腥味	没有鱼香、油脂香, 异味、蒸煮味或腥味明显
质地 texture	质地软硬适中, 口感适宜	质地略软或略硬, 口感可以接受	质地过软或过硬、松散
滋味 taste	鱼香、油脂香明显, 无异味、蒸煮味、腥味或苦味	略有鱼香、油脂香, 略有异味、蒸煮味或腥味、苦味	没有鱼香、油脂香, 异味、蒸煮味或腥味明显

色观察酥骨草鱼块的肌肉微观结构。取酥骨草鱼块内部鱼肉切成 $1\text{ cm} \times 1\text{ cm} \times 1\text{ cm}$ 的小块, 用 10% 甲醛溶液固定 48 h, 然后参考李想^[12] 的方法脱水、包埋、切片、干燥、脱蜡、染色(染色剂为伊红和苏木素)、复水、封片, 在光学显微镜下观察。

鱼骨样品的制备 用于建立酥骨率评价方法的鱼骨标准样品取自包含全部肋骨刺的草鱼鱼排, 将鱼排置于沸水浴中直到鱼肉完全熟化, 冷却后取刺、清洗、自然干燥。依照形态与在草鱼身体中的分布位置(图 1-a)将肋骨刺分为 4 类, 分别记为 1~4 号, 分类标准: 1 号鱼骨整体坚实, 为扁圆柱形, 呈不透明的乳白色, 中部宽度

2.0~3.0 mm, 约为从鱼头端起第 1~2 根鱼骨; 2 号鱼骨整体比较坚实, 为略扁平的片状, 头部略透明, 其他部分呈不透明的乳白色, 中部宽度 1.0~2.0 mm, 约为从鱼头端起第 3~7 根鱼骨; 3 号鱼骨整体比较纤细, 为扁平片状, 整体呈半透明, 中部宽度 0.5~1.0 mm, 约为从鱼头端起第 8~12 根鱼骨; 4 号鱼骨整体很纤细, 为细线状, 整体呈半透明, 中部宽度小于 0.5 mm, 约为从鱼头端起第 13~16 根鱼骨。用 10% 乙酸(体积比)浸泡 1~4 号鱼骨 24 h, 得到软化的鱼骨标准样品, 分别记为 5~8 号, 如图 1-b 所示。

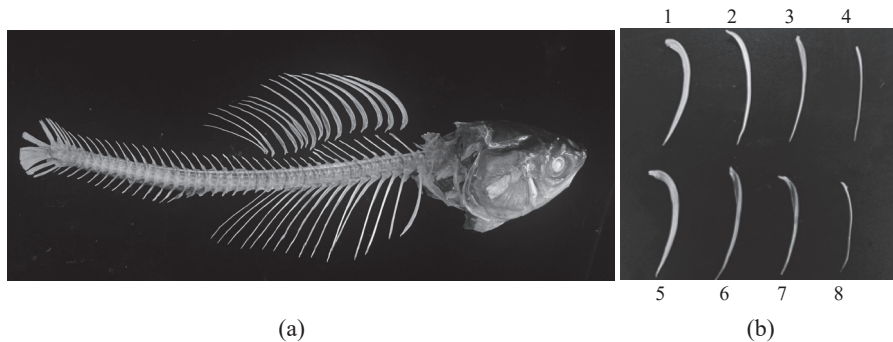


图 1 酥骨率评价方法的建立

(a) 草鱼的骨架图; (b) 鱼骨标准样品, 编号 1~8 即为鱼骨标准样品 1~8, 图 5 同。

Fig. 1 Establishment of the fish bone softening rate measuring method

(a) skeleton of a *C. idella*; (b) fish bone standard sample, no. 1-8 are the standard samples of fish bones 1-8, the same as Fig. 5.

取 1.2% 乙酸-120 W 超声-45 min 处理时间(称为超声-乙酸组)、1.2% 乙酸-0 W 超声-45 min 处理时间(称为仅乙酸组)、0% 乙酸-120 W 超声-45 min 处理时间(称为仅超声组)和 CK 组的酥骨草鱼块样品, 取出其中的鱼骨, 选取形态类似图 1-b 中 2 号鱼骨标准样品的鱼骨作为酥骨机制

研究中使用的样品。

鱼骨的感官评价 鱼骨标准样品的感官评价由 20 人组成的感官小组完成 ($n=20$), 男女比例约 1:1, 成员均经过培训。感官评价指标为鱼骨强度(为方便区分, 下文中称为感官鱼骨强度)。评价方法为: 双手持鱼刺, 大拇指和食指抵住鱼

刺中部进行弯折, 根据弯折时手指受到的抵抗力、弯折难易程度及弯折后鱼骨的形变恢复速度综合评判鱼骨强度。设定评分标准如下: 1~4分, 鱼骨强度较低, 硬度小, 容易弯曲形变或容易被折断; 5~7分, 鱼骨强度中等, 硬度中等, 对弯曲形变有一定抵抗力; 8~10分, 鱼骨强度较高, 硬度大, 不容易弯曲形变或被折断。

鱼骨的质构分析 对鱼骨标准样品 1~8 号以及从不同工艺条件下酥骨草鱼块样品中取出的鱼骨进行质构分析。使用自行设计的鱼骨夹持器具将鱼骨固定 (图 2), 用 CT3 质构仪测定鱼骨的硬度和弹性, 测试参数如下: TPA 模式, 形变 10%, 触发点负载 7 g, 测试速度 1 mm/s, 循环 2 次。

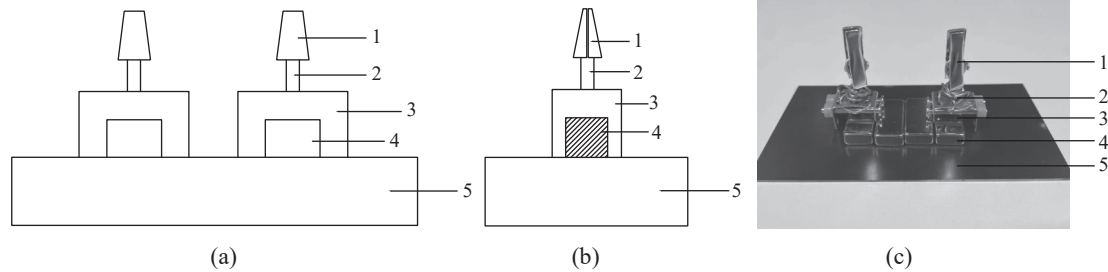


图 2 鱼骨夹持器具

(a) (b) 鱼骨夹持器具的设计图 (正视图和侧视图), (c) 鱼骨夹持器具的实物图。1. 夹子, 2. 连接杆, 3. 连接座, 4. 磁吸装置, 5. 底座。其中连接杆、连接座和底座均为铁制, 鱼骨夹持组件 (1、2、3) 和底座通过磁吸装置固定在一起, 并且能灵活调整两组组件之间的距离, 以适用于不同长度的鱼骨的固定。

Fig. 2 The fish bone holding apparatus

(a) (b) design (front and side views) of the fish bone holding apparatus, (c) photo of the fish bone holding apparatus. 1. clip, 2. connecting rod, 3. connecting seat, 4. magnetic suction device and 5. base. The connecting rod, connecting seat and base are all made of iron, the fish bone holding components (1, 2, 3) and the base are fixed together by a magnetic suction device, and the distance between the two sets of components can be flexibly adjusted for the fixation of fish bones of different lengths.

傅里叶红外光谱 参考王晓芸等^[13]的方法, 将用于鱼骨酥化机制研究的鱼骨样品于 50 °C 烘干 24 h, 研磨后过 100 目筛。将色谱级 KBr 于 120 °C 烘干 24 h, 取 200 mg KBr 与 2 mg 鱼骨粉混合研磨, 于 29 MPa 压片 1 min, 所得压片使用 Frontier 傅里叶红外光谱仪进行测试, 扫描波数范围 400~4 000 cm^{-1} , 扫描次数 32 次, 分辨率 1 cm^{-1} 。

鱼骨微观结构 将用于鱼骨酥化机制研究的鱼骨样品切成 3 mm 的小段, 参考 Liu 等^[6]的方法进行样品的前处理, 使用扫描电子显微镜观察鱼骨侧面的微观结构。

1.4 数据分析

除非特殊说明, 实验均做 3 次平行 ($n=3$), 数据以平均值 \pm 标准差表示。使用 Origin 2021 软件作图, 使用 SPSS 25.0 软件进行 Duncan 氏显著性差异分析及 Pearson 相关性分析, 其中 $P<0.05$ 代表差异显著。

2 结果

2.1 超声联合乙酸处理对草鱼块品质的影响

感官评价 感官评价可以描述不同超声联

合乙酸处理条件下草鱼块中鱼骨的酥化程度以及产品的感官品质。如表 2 所示, 对于不同浓度乙酸处理的样品, 鱼骨酥化程度随着乙酸浓度的上升逐渐提高, 1.2%、1.8%、2.4% 乙酸组得分显著高于对照组和仅超声处理的 0% 乙酸组 ($P<0.05$)。随着乙酸浓度的增加, 感官评价员对样品的酸味接受度逐渐下降, 但均保持在感官可接受的范围内 (得分高于 4 分)。在色泽方面, 当乙酸浓度较低时样品表面的金黄色较浅, 较高时则过深, 1.2% 乙酸组具有最受评价员喜爱的金黄色。在气味和质地方面, 仅 1.8%、2.4% 乙酸组得分显著低于对照组 ($P<0.05$)。在滋味方面, 仅 2.4% 乙酸组得分显著低于对照组 ($P<0.05$)。对于不同超声功率处理的样品, 所有处理组的鱼骨酥化程度均显著高于对照组 ($P<0.05$), 但组间无显著差异。在酸味接受度方面, 0 W、60 W、90 W 和 120 W 组得分略低于对照组, 150 W 组显著低于对照组 ($P<0.05$), 但均被认为酸味不明显。在质地方面, 只有 150 W 组得分显著低于对照组 ($P<0.05$)。在色泽、气味和滋味方面, 不同超声功率的处理组与对照组间无显著差异。对于不同处理时间的样品, 15 min、30 min 和 45 min 组的鱼骨酥化程度均显

著高于 CK 组 ($P<0.05$), 但 3 组间无显著差异。除了 60 min 组的色泽得分低于其他组, 不同处理时

间之间的酸味接受度、气味、质地、滋味均无显著差异。

表 2 不同超声联合乙酸处理的酥骨草鱼块感官评价结果

Tab. 2 Sensory evaluation of samples with different ultrasound-acetic acid treatments

样品 sample	鱼骨酥化程度 fish bone softness	酸味接受度 sourness	色泽 color	气味 smell	质地 texture	滋味 taste	总分 total score
不同浓度乙酸的处理组 [超声功率120 W, 处理时间45 min] treatment groups with different concentrations of acetic acid [ultrasound power 120 W, treatment time 45 min]							
CK	3.50±1.19 ^c	8.50±0.76 ^a	6.42±1.55 ^{bc}	7.83±1.07 ^a	7.25±1.36 ^a	7.67±0.94 ^a	40.92±5.04 ^a
0%	4.83±1.95 ^b	8.00±1.15 ^{ab}	7.00±0.82 ^{bc}	7.92±0.86 ^a	6.92±1.38 ^{ab}	7.25±1.16 ^a	41.83±5.35 ^a
0.6%	5.92±1.38 ^{ab}	7.67±1.37 ^{ab}	7.25±0.60 ^{ab}	7.00±1.15 ^{ab}	6.71±1.45 ^{ab}	7.25±1.09 ^a	41.29±5.25 ^a
1.2%	6.17±1.62 ^{ab}	7.33±1.11 ^{ab}	8.42±0.64 ^a	6.92±1.38 ^{ab}	6.38±1.34 ^{ab}	7.21±1.22 ^a	42.00±4.83 ^a
1.8%	6.08±1.32 ^{ab}	6.50±2.14 ^{bc}	7.42±2.14 ^{ab}	6.75±1.30 ^b	5.75±1.23 ^b	6.67±1.18 ^a	39.17±4.10 ^{ab}
2.4%	6.83±1.57 ^a	5.92±2.39 ^c	5.71±2.13 ^c	6.00±1.58 ^b	5.67±1.65 ^b	5.63±1.40 ^b	35.13±4.90 ^b
不同超声功率的处理组 [乙酸浓度1.2% (体积比), 处理时间45 min] treatment groups with different ultrasound powers [acetic acid concentration of 1.2% (V/V), treatment time of 45 min]							
CK	3.50±1.19 ^b	8.50±0.76 ^a	6.42±1.55 ^a	7.83±1.07 ^a	7.25±1.36 ^{ab}	7.67±0.94 ^a	40.92±5.04 ^a
0 W	6.33±1.65 ^a	7.33±1.25 ^{ab}	7.17±1.07 ^a	7.13±1.04 ^a	7.13±0.87 ^{ab}	7.08±0.95 ^a	42.5±3.15 ^{bc}
60 W	6.67±1.60 ^a	8.00±1.00 ^{ab}	7.42±1.11 ^a	7.71±0.66 ^a	7.67±0.92 ^{ab}	7.67±0.94 ^a	45.04±3.26 ^{ab}
90 W	6.38±1.70 ^a	8.00±1.15 ^{ab}	7.17±1.07 ^a	7.96±0.92 ^a	7.54±1.07 ^{ab}	7.75±0.92 ^a	44.63±3.67 ^{ab}
120 W	7.58±1.11 ^a	7.50±1.38 ^{ab}	7.42±1.06 ^a	7.83±0.8 ^a	7.88±0.71 ^a	7.67±0.75 ^a	45.92±2.79 ^a
150 W	6.79±1.52 ^a	7.17±0.90 ^b	7.08±1.55 ^a	7.33±0.94 ^a	6.71±1.05 ^b	7.25±1.11 ^a	42.08±3.55 ^{bc}
不同处理时间的处理组 [乙酸浓度1.2% (体积比), 超声功率120 W] treatment groups with different durations [acetic acid concentration of 1.2% (V/V), ultrasound power 120 W]							
CK	3.50±1.19 ^c	8.50±0.76 ^a	6.42±1.55 ^{ab}	7.83±1.07 ^a	7.25±1.36 ^{ab}	7.67±0.94 ^{ab}	40.92±5.04 ^b
15 min	8.00±1.08 ^a	8.00±1.15 ^a	7.00±1.73 ^{ab}	7.75±0.83 ^a	8.00±0.91 ^a	8.00±0.71 ^a	46.92±2.81 ^a
30 min	7.00±1.29 ^{ab}	8.17±1.07 ^a	7.25±1.01 ^a	7.38±1.34 ^a	6.92±1.30 ^{ab}	7.17±1.28 ^{ab}	43.29±5.21 ^{ab}
45 min	6.83±1.77 ^{ab}	7.67±1.49 ^a	7.08±1.44 ^a	7.46±0.80 ^a	6.92±1.04 ^{ab}	7.42±0.95 ^{ab}	43.50±3.41 ^{ab}
60 min	6.50±1.32 ^b	7.83±1.46 ^a	5.67±1.70 ^b	7.17±0.99 ^a	6.38±1.40 ^b	6.75±1.48 ^b	39.63±5.30 ^b

注: 在每个单因素实验组 (不同乙酸浓度、不同超声功率、不同处理时间) 中, 同列数据不同肩标小写字母代表样品之间差异显著 ($P<0.05$)。Notes: Different lowercase letters in the same column in each One-Way experimental group (different acetic acid concentrations, different ultrasonic power, different treatment durations) represent significant differences ($P<0.05$) between samples.

pH 值 随着乙酸浓度的增加、超声功率的增加以及处理时间的延长, 酥骨草鱼块内部鱼肉的 pH 值均有显著下降 ($P<0.05$) (图 3)。虽然统计学上具有显著差异, 但所有组的 pH 值均高于 6.0, 属于低酸性食品^[14]。只进行时间相对较短的超声联合乙酸处理不会大幅度降低酥骨草鱼块内部鱼肉的 pH 值。

色泽 表面色泽是评价油炸制品品质的重要指标之一。如图 4 所示, 随乙酸浓度的增加, 酥骨草鱼块表面的亮度下降, 红度和黄度上升, 样品表面的金黄色由浅变深。感官评价结果表明, 1.2% 乙酸组鱼块表面的金黄色最受评价员喜爱, 而当亮度继续下降、红度和黄度继续上升时, 样

品表面颜色过深, 喜好度下降。随超声功率的增加, 样品表面亮度下降, 红度上升, 黄度先逐渐上升后下降, 120 W 组的黄度最高。随处理时间的延长, 样品表面红度和黄度增加, 处理组的样品表面亮度显著低于对照组 ($P<0.05$), 但处理组之间无显著差异。

鱼肉组织结构 如图版 I 所示, 经过超声联合乙酸处理、盐水腌制、油炸、真空包装和高温灭菌后, 各组酥骨草鱼块的肌肉组织结构都遭到了一定程度的破坏, 其中 CK 组的肌肉组织被破坏的最严重, 组织间隙大, 几乎不可见完整的肌细胞结构。仅超声处理的 0% 乙酸组和仅乙酸处理的 0 W 组的肌肉组织破坏程度次之, 几乎不

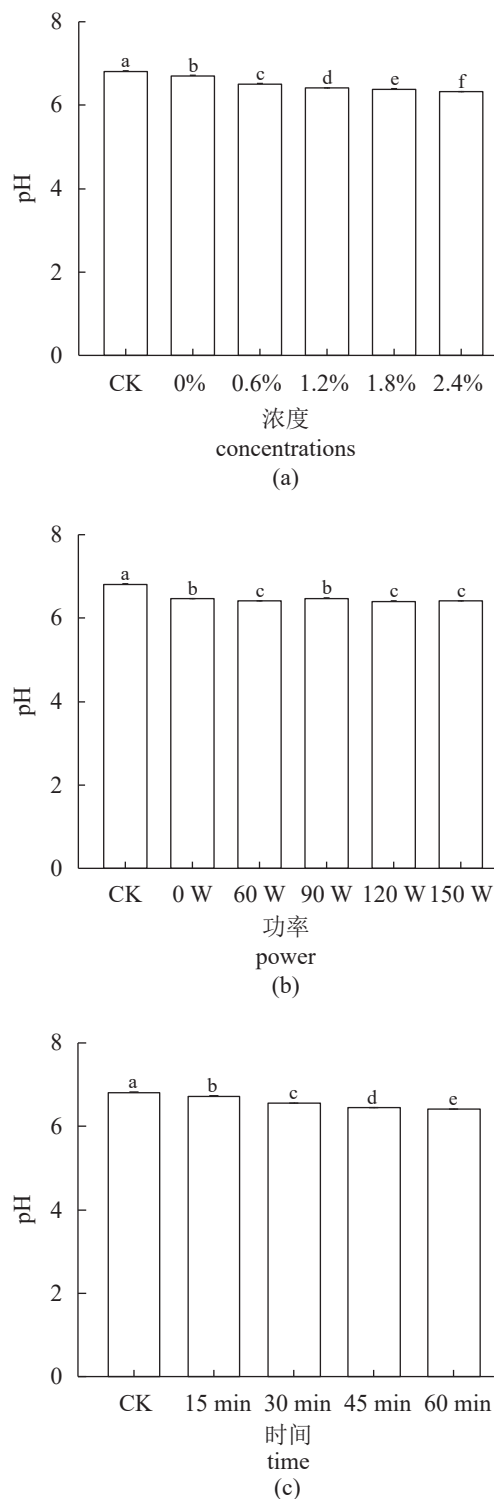


图3 不同超声联合乙酸处理的酥骨草鱼块的 pH 值变化 (a) 不同乙酸浓度; (b) 不同超声功率; (c) 不同处理时间。不同小写字母代表差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

Fig. 3 Changes in pH value of samples with different ultrasound-acetic acid treatments

(a) different acetic acid concentrations; (b) different ultrasound powers; (c) different treatment durations. Different lowercase letters represent significant differences ($P < 0.05$), the same below.

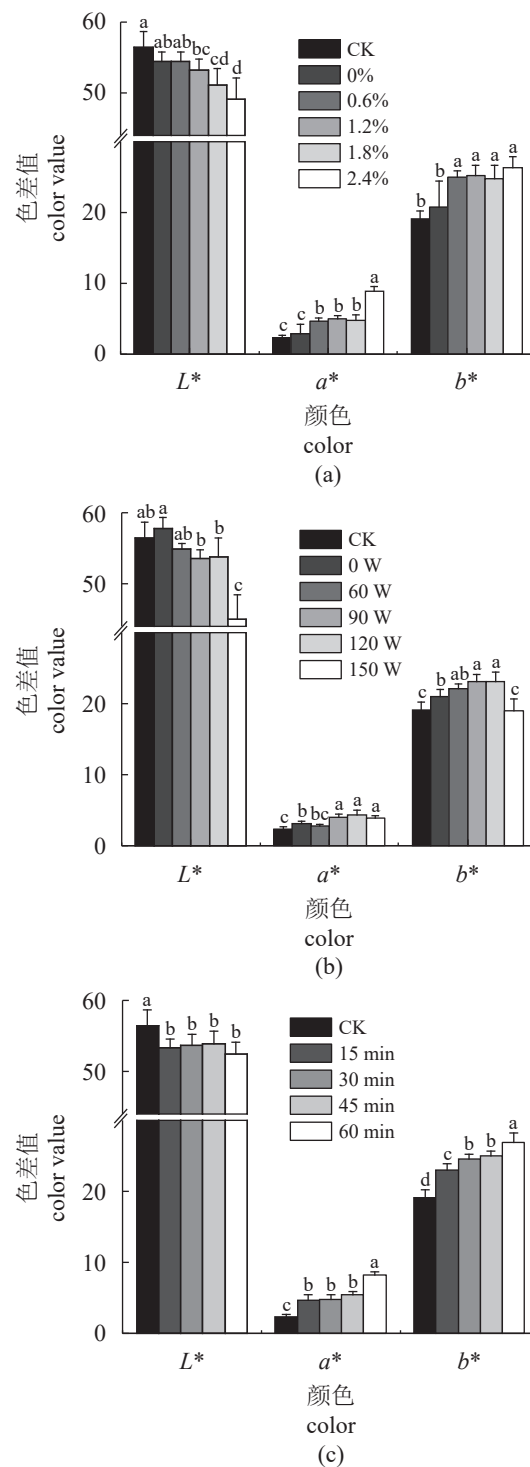
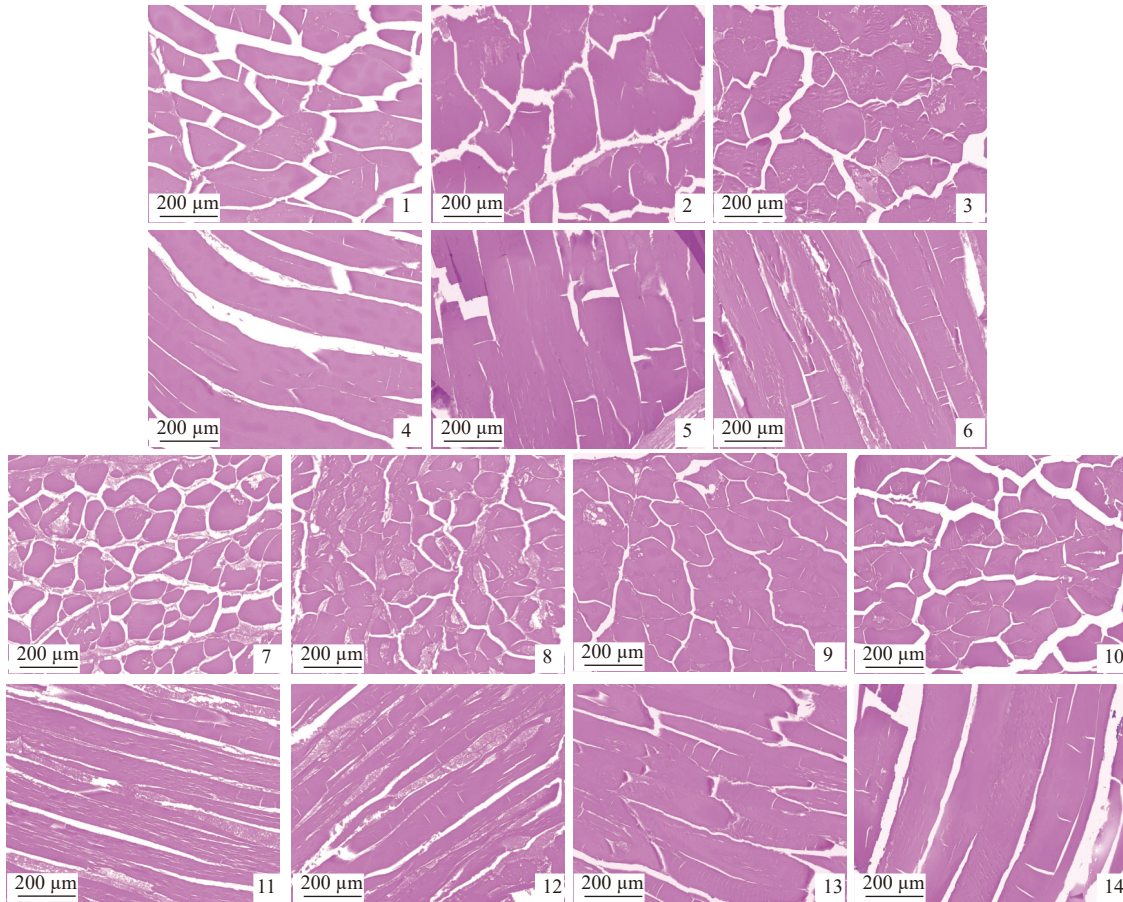


图4 不同超声联合乙酸处理的酥骨草鱼块的色泽变化
Fig. 4 Changes in color of samples with different ultrasound-acetic acid treatments

可见完整的肌细胞结构, 但组织间隙较小。经超声联合乙酸处理的鱼肉肌肉组织结构保留相对完整, 其中 1.2% (1.2%-120 W-45 min, 最佳工艺条件组)、2.4% 乙酸组的肌肉组织破坏程度最小, 组



图版 I 不同超声联合乙酸处理酥骨草鱼块的 H.E 组织切片染色图

1、2、3、7、8、9、10 分别为 CK、0% (0%-120 W-45 min)、0 W (1.2%-0 W-45 min)、1.2% (1.2%-120 W-45 min, 最佳工艺条件组)、2.4% (2.4%-120 W-45 min)、60 W (1.2%-60 W-45 min)、15 min (1.2%-120 W-15 min) 组鱼肉横切图; 4、5、6、11、12、13、14 分别为 CK、0%、0 W、1.2%、2.4%、60 W、15 min 组鱼肉纵切图。

Plate I H.E stained muscle structure of samples with different ultrasound-acetic acid treatments

1, 2, 3, 7, 8, 9, 10 are transverse muscle structure from CK, 0% (0%-120 W-45 min), 0 W (1.2%-0 W-45 min), 1.2% (1.2%-120 W-45 min, optimal process conditions group), 2.4% (2.4%-120 W-45 min), 60 W (1.2%-60 W-45 min), and 15 min (1.2%-120 W-15 min) groups, respectively; 4, 5, 6, 11, 12, 13, 14 are longitudinal muscle structure from CK, 0%, 0 W, 1.2%, 2.4%, 60 W, and 15 min groups, respectively.

织结构紧密, 具有较完整的肌细胞外形。

2.2 鱼骨酥化评价

酥骨率评价方法的建立 对于未软化的鱼骨标准样品 1~4 号, 样品的感官鱼骨强度逐渐下降, 不同编号鱼骨标准样品的感官鱼骨强度有显著差异 ($P<0.05$) (图 5)。对于软化的鱼骨标准样品 5~8 号, 其感官鱼骨强度从 5 号到 8 号显著下降 ($P<0.05$)。对比同一形态分类下的未软化与软化的鱼骨标准样品 (1 号与 5 号、2 号与 6 号、3 号与 7 号、4 号与 8 号), 软化的鱼骨标准样品相较于未软化的鱼骨标准样品的感官鱼骨强度显著下降 ($P<0.05$)。鱼骨标准样品的感官鱼骨强度在评分区间中分布较为均匀, 各种类鱼骨软化与不软化之

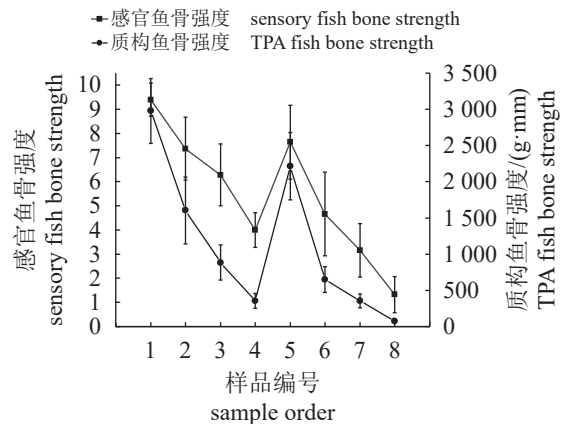


图 5 鱼骨标准样品的感官鱼骨强度与质构鱼骨强度
Fig. 5 Sensory and TPA fish bone strength of the standard fish bone samples

间的感官鱼骨强度均具有显著差异, 这说明本研究中制备的鱼骨标准样品具有较好的代表性, 起到标准样品的作用, 可用于酥骨率评价方法的建立。所有鱼骨标准样品中, 4号、7号和8号的感官鱼骨强度评分低于4分, 在感官评价中这三组鱼骨标准样品被认为是较软的。

在质构测试中发现, 鱼骨的硬度和弹性从不同角度反映了鱼骨强度的变化。为了综合描述鱼骨的强度, 定义质构鱼骨强度 ($\text{g}\cdot\text{mm}$) = 硬度 (g) \times 弹性 (mm)。对质构鱼骨强度与感官鱼骨强度数据进行 Pearson 相关性分析, Pearson 相关系数为 0.783, 相关性显著 ($P < 0.01$), 说明质构鱼骨强度可以较好地反映受试者对鱼骨强度的感官感受。感官分析中被认为较软的鱼骨标准样品为 4号、7号和 8号, 这三组样品的质构鱼骨强度均 $\leq 300 \text{ g}\cdot\text{mm}$, 故将质构鱼骨强度 $\leq 300 \text{ g}\cdot\text{mm}$ 作为判定鱼骨“软”的客观标准, 以此为基础建立了酥骨率评价方法: ①准备样品, 将待测鱼块中所有鱼骨

取出, 每组鱼块样品所含总鱼骨数需 ≥ 20 , 将鱼块内的鱼骨总数记为 n , 其中因过软无法从鱼肉中分离的鱼骨数量记为 a (注: 取出的鱼骨长度 \leq 该鱼骨原本长度的 60% 记为无法取出); ②将取出的鱼骨进行质构分析, 计算其质构鱼骨强度 ($\text{g}\cdot\text{mm}$) = 硬度 (g) \times 弹性 (mm); ③质构鱼骨强度 $> 300 \text{ g}\cdot\text{mm}$ 的鱼骨被认为“硬”, 记硬鱼骨数为 b ; 质构鱼骨强度 $\leq 300 \text{ g}\cdot\text{mm}$ 的鱼骨被认为“软”, 记软鱼骨数为 c ; ④酥骨率 = $(a+c)/n \times 100\%$ 。

超声联合乙酸处理草鱼块的酥骨率 如表 3 所示, 利用“酥骨率评价方法的建立”所述的酥骨率评价方法对超声联合乙酸处理的最佳工艺条件进行筛选, 使用该方法可以客观比较不同工艺下鱼骨的酥化情况。对比发现, 超声联合乙酸处理后获得的酥骨草鱼块样品的酥骨率均高于市售的某种酥骨即食鱼产品。随乙酸浓度的增加, 酥骨率先上升后下降, 1.2% 乙酸处理下获得的酥骨率最高。随超声功率的增加, 酥骨率也呈现先

表 3 不同超声联合乙酸处理的草鱼块酥骨率

Tab. 3 Fish bone softening rate of samples with different ultrasound-acetic acid treatments

组别 group	鱼骨总数 total fish bone number	未取出数 number of untaken bones	酥骨数 number of soft bones	酥骨率/% fish bone softening rate
CK	30	10	8	60.00
不同浓度乙酸的处理组 [超声功率 120 W, 处理时间 45 min] treatment groups with different concentrations of acetic acid [ultrasound power 120 W, treatment time 45 min]				
0%	20	2	12	70.00
0.60%	28	10	10	71.43
1.20%	25	11	12	92.00
1.80%	29	10	16	89.66
2.40%	31	10	10	64.52
不同超声功率的处理组 [乙酸浓度 1.2% (体积比), 处理时间 45 min] treatment groups with different ultrasound powers [acetic acid concentration of 1.2% (V/V), treatment time of 45 min]				
0 W	35	4	18	62.86
60 W	28	4	16	71.43
90 W	28	8	13	78.57
120 W	29	12	15	93.10
150 W	24	4	12	66.67
不同处理时间的处理组 [乙酸浓度 1.2% (体积比), 超声功率 120 W] treatment groups with different durations [acetic acid concentration of 1.2% (V/V), ultrasound power 120 W]				
15 min	33	11	17	84.85
30 min	26	5	14	73.08
45 min	26	12	13	96.15
60 min	27	9	13	81.48
某市售产品 commercial products	21	1	10	52.38

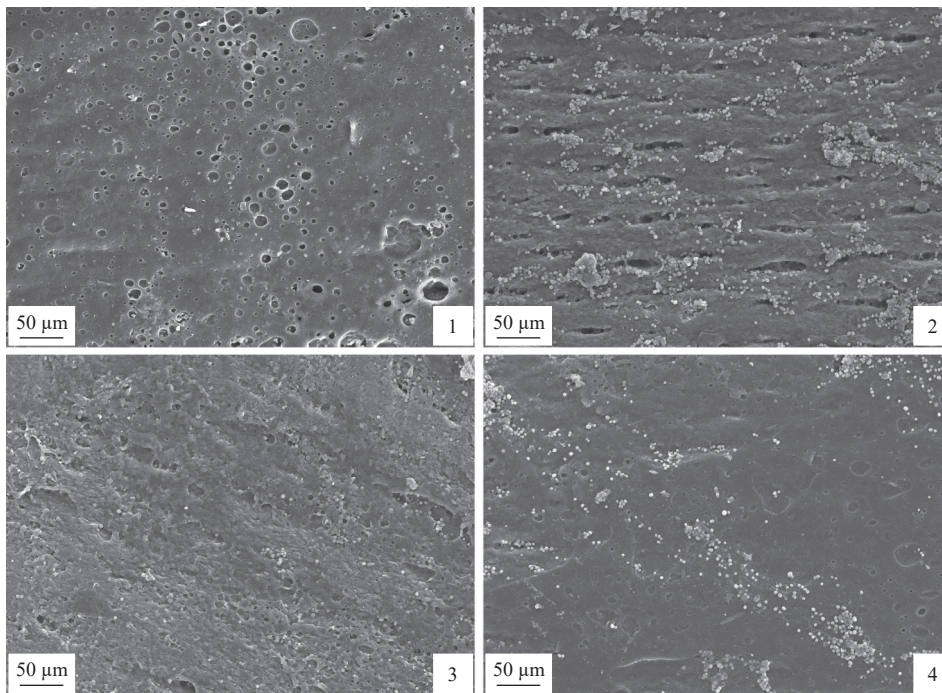
上升后下降的趋势, 120 W 超声处理下获得的酥骨率最高。随处理时间的增加, 酥骨率呈现一定的波动变化, 在处理时间为 45 min 时表现出最高的酥骨率。根据酥骨率评价得到的最佳工艺条件为: 乙酸浓度 1.2% (体积比), 超声功率 120 W, 处理时间 45 min。

2.3 超声联合乙酸处理的鱼骨酥化机制

微观结构 如图版 II, 未经处理的 CK 组鱼骨表面完整, 几乎观察不到碎片和破损。CK 组鱼骨表面带有一些小孔, 这可能是由于在油炸和高温灭菌的热加工过程中, 鱼骨表层的胶原蛋白发生凝胶化形成的^[15]。超声联合乙酸组的鱼骨表面出现明显的细长形孔洞, 观察到鱼骨表面有破损和残留的碎片。仅超声组的鱼骨表面也出现一定破损, 但没有超声-乙酸组的变化明显。

鱼骨化学结构分析 傅里叶红外光谱可以同时分析鱼骨中胶原蛋白的结构、羟基磷灰石的含量以及胶原蛋白与羟基磷灰石之间结合的强度, 是分析超声联合乙酸处理对鱼骨影响的有力工具。3 400~3 440 cm^{-1} 为酰胺 A 带, 当胶原蛋白的 N-H 基团参与氢键时, 酰胺 A 带的吸收峰会发生右

移^[16]。当胶原蛋白中羟基损失时, 酰胺 A 带的吸收峰会左移^[17]。羟基在胶原蛋白中含量非常丰富, 鱼骨中胶原蛋白和羟基磷灰石通过共享羟基紧密结合, 因此酰胺 A 带吸收峰的左移代表了胶原蛋白与羟基磷灰石之间的结合被削弱。如图 6 所示, 与 CK 组相比, 三个处理组酰胺 A 带吸收峰均出现左移, 其中超声-乙酸组左移最多, 说明超声处理和乙酸处理均能削弱鱼骨中胶原蛋白与羟基磷灰石的结合, 最佳工艺条件下的超声联合乙酸处理的削弱作用最强。酰胺 I、酰胺 II 和酰胺 III 带分别位于图谱的 1 650~1 635 cm^{-1} 、1 550~1 535 cm^{-1} 和 1 240 cm^{-1} 处^[18], 其中 1 240 cm^{-1} 与 1 454 cm^{-1} 处的吸收比代表了胶原蛋白中三螺旋结构的状态^[19], 结构较完整的胶原蛋白在 1 240 cm^{-1} 与 1 454 cm^{-1} 处吸收比接近 1。CK 组与三个处理组在 1 240 cm^{-1} 与 1 454 cm^{-1} 处的吸收比均小于 1, 可能是热加工对胶原蛋白的三螺旋结构造成了影响。超声-乙酸组在 1 240 cm^{-1} 与 1 454 cm^{-1} 处的吸收比略小于 CK 组, 说明超声联合乙酸处理能一定程度上促进胶原蛋白结构的破坏。图 6 中部分组在 1 630 cm^{-1} 附近出现尖峰, 可能是鱼骨从经油炸的鱼块中取出, 有部分油脂残留所致^[20]。



图版 II 不同处理的酥骨草鱼块中鱼骨的微观结构图

1~4 分别为 CK 组, 超声联合乙酸组, 仅超声组, 仅乙酸组。

Plate II Microstructure of fish bones from soft bone *C. idella* pieces under different treatments

1-4 are the CK group, the ultrasound-acetic acid group, the ultrasound only group, the acetic acid only group, respectively.

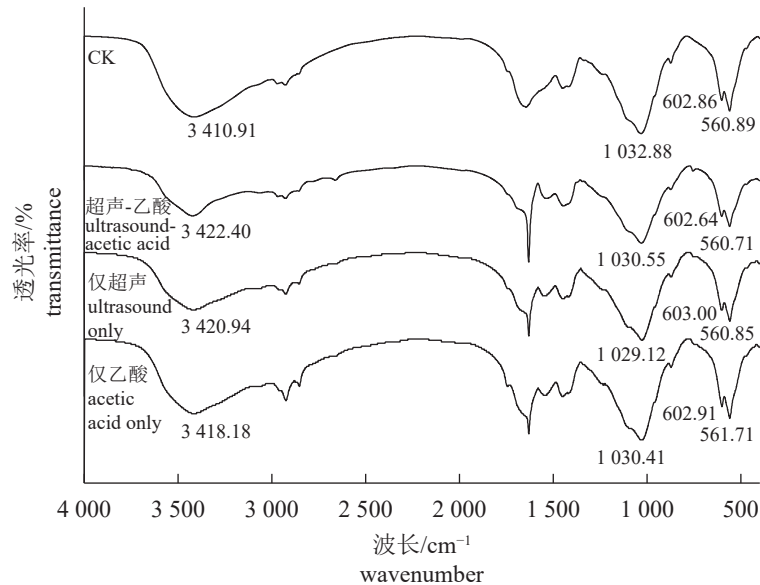


图6 不同处理的酥骨草鱼块中鱼骨的傅里叶红外光谱图

Fig. 6 FTIR spectra of fish bones from soft bone *C. idella* pieces under different treatments

PO_4^{3-} 的特征吸收峰出现在 $1\ 030\ \text{cm}^{-1}$ 、 $603\ \text{cm}^{-1}$ 和 $561\ \text{cm}^{-1}$ 附近, 其吸收峰强度可以代表鱼骨中羟基磷灰石的含量变化^[21]。超声-乙酸组的3个 PO_4^{3-} 吸收峰均低于CK组, 说明超声联合乙酸处理后鱼骨中的羟基磷灰石含量下降。

3 讨论

3.1 超声联合乙酸处理的鱼骨酥化效果及对草鱼块品质的影响

使用本研究建立的酥骨率评价方法, 筛选所得最佳的超声联合乙酸酥骨工艺条件为: 乙酸浓度 1.2% (体积比), 超声功率 120 W, 处理时间 45 min (下文简称为最佳条件)。该处理组合在乙酸浓度、超声功率、处理时间 3 组单因素实验中均出现, 且均具有该组单因素实验中最高的酥骨率。超声联合乙酸处理也必然会对鱼肉产生影响, 因此研究从感官属性、酸度、表面色泽、肌肉组织结构几个方面评价了不同条件超声联合乙酸处理的酥骨草鱼块。结果表明, 最佳处理条件下的酥骨草鱼块具有接受度较高的酸味、诱人的金黄色与紧实的口感。鱼块表面带有更诱人的金黄色可能是因为超声联合乙酸处理促进了鱼肉肌原纤维蛋白的降解^[22], 部分降解产生的氨基酸和肽段附着在鱼肉表面, 在油炸过程中发生了美拉德反应^[23]。鱼块肌纤维结构更加紧密完整可能是因为该处理使肌原纤维蛋白发生变性, 鱼肉部分脱水,

降低了后续热处理对鱼肉组织结构的破坏, 使鱼肉不会过于软烂、出汁, 保持较好的咀嚼性。

3.2 超声联合乙酸处理的鱼骨酥化机制

为了进一步探究超声联合乙酸处理的酥骨机制, 对最佳条件处理组、CK组、仅超声组和仅乙酸组的酥骨草鱼块进行了鱼骨的微观结构分析。鱼骨由纤维骨层组成, 每层的主要成分是胶原蛋白和羟基磷灰石。鱼骨生成过程中, 胶原蛋白纤维首先交错排列形成带孔的束状结构, 羟基磷灰石晶体则嵌在孔洞中并不断生长^[24]。鱼骨中的胶原蛋白为其提供了韧性, 羟基磷灰石为其提供了刚性, 二者相互作用形成了具有强韧的力学特性的鱼骨结构^[25]。扫描电子显微镜观察发现单独的超声处理或乙酸处理都未能对鱼骨的结构产生明显影响, 但超声联合乙酸处理能够破坏鱼骨的原有的结构, 使其变得疏松、多孔。骨骼的力学性能是由矿物质和有机物等主要成分的相对数量和空间排列决定的^[26]。傅里叶红外光谱结果表明, 超声联合乙酸处理能削弱胶原蛋白与羟基磷灰石之间的结合, 促使羟基磷灰石逸出, 后续的热处理也可能进一步破坏胶原蛋白的三螺旋结构, 使鱼骨的硬度和韧性下降。超声联合乙酸处理能够破坏鱼骨原有结构的原因可能是: ①超声处理和乙酸处理都可促进鱼骨中羟基磷灰石溶解^[6-8], 二者联合起到了协同作用; ②超声处理促进了乙酸进入鱼肉内部, 并产生一定的热效应, 促进了乙酸对鱼骨的软化^[27-28]。

4 结论

本研究建立了一种超声联合乙酸处理的草鱼骨酥化工艺, 评价了不同工艺条件下酥骨草鱼块的感官属性、色泽、pH值和肌肉组织结构。为了客观评价不同工艺条件下草鱼块的鱼骨酥化情况, 研究建立了一套即食草鱼制品中酥骨率评价方法。以此为基础, 结合鱼块品质指标, 确定了草鱼块酥骨工艺的最佳条件为: 乙酸浓度 1.2% (体积比), 超声功率 120 W, 处理时间 45 min。该条件下获得的草鱼块色泽、质地、滋味均较好, 在实现酥骨的同时不影响草鱼块本身的品质。最佳工艺条件下草鱼块酥骨机制为: 超声联合乙酸处理削弱了胶原蛋白与羟基磷灰石之间的结合, 破坏了胶原蛋白的结构, 并促使羟基磷灰石逸出。总之, 本研究可为淡水鱼酥骨技术的研发提供思路, 为即食酥骨鱼制品的开发提供理论支持。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 中国渔业统计年鉴-2023[M]. 北京: 中国农业出版社, 2023.
- Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook 2023[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2023.
- [2] 梁佳敏, 张伊涵, 田明礼, 等. 中国淡水鱼休闲食品发展现状与消费嗜好分析 [J]. 中国渔业质量与标准, 2023, 13 (6): 40-47.
- Liang J M, Zhang Y H, Tian M L, et al. Analysis of the current development status and consumer preferences of freshwater fish snack foods in China[J]. *China Fishery Quality and Standards*, 2023, 13 (6): 40-47.
- [3] Huang H Y, Wang C C. Migration of a fish bone from the esophagus to the thyroid gland[J]. *Ear, Nose & Throat Journal*, 2022: 1455613221086032.
- [4] He Y, Tian F Y, Yang M M, et al. Cerebral embolisms caused by a fishbone[J]. *European Heart Journal - Cardiovascular Imaging*, 2022, 23 (1): e3.
- [5] Chen P L, Chiang C W, Shiao C C. Tongue abscess induced by embedded remnant fishbone[J]. *Acta Clinica Belgica*, 2015, 70 (6): 466-467.
- [6] Liu Y Y, Jiang H M, Zhang L T, et al. Diluted acetic acid softened Intermuscular bones from silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) by dissolving hydroxyapatite and collagen[J]. *Foods*, 2021, 11 (1): 1.
- [7] Shimosaka C. Relationship between chemical composition and crystalline structure in fish bone during cooking[J]. *Journal of Clinical Biochemistry and Nutrition*, 1999, 26 (3): 173-182.
- [8] Guo J J, Zhu S L, Chen H B, et al. Ultrasound-assisted solubilization of calcium from micrometer-scale ground fish bone particles[J]. *Food Science & Nutrition*, 2022, 10 (3): 712-722.
- [9] Zou Y, Wang L, Cai P P, et al. Effect of ultrasound assisted extraction on the physicochemical and functional properties of collagen from soft-shelled turtle calipash[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2017, 105: 1602-1610.
- [10] 黄荣秋, 臧明伍, 李海花, 等. 超声波技术在肉品加工中的应用研究进展 [J]. 食品工业科技, 2023, 44 (20): 431-439.
- Huang R Q, Zang M W, Li H H, et al. Research advance of application of ultrasonic treatment in meat processing[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44 (20): 431-439.
- [11] 汪之颖, 陈静茹, 陈可欣, 等. 低盐腌制对生鲜草鱼片冷藏过程中品质变化的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2015, 20 (6): 249-255.
- Wang Z Y, Chen J R, Chen K X, et al. Effect of low salt on the quality changes of raw grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) fillets during chilled storage[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2015, 20 (6): 249-255.
- [12] 李想. 调理鱼“蒜瓣肉”结构形成与工艺优化 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.
- Li X. Structure formation and process optimization of the "garlic clove-like fish" in conditioned fish fillets[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022.
- [13] 王晓芸, Jayasooriya M C N, 熊善柏, 等. 藤黄果对腌制草鱼鱼刺的软化作用 [J]. 食品科学, 2023: 1-11.
- Wang X Y, Jayasooriya M C N, Xiong S B, et al. Study on softening effect of *Garcinia gummi-gutta* on pickled grass carp ribs[J]. *Food Science*, 2023: 1-11.
- [14] 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 商业无菌检验: GB

- 4789.26—2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- National Health Commission, State Administration for Market Regulation. National food safety standard - Food microbiological examination - Commercial sterilization: GB 4789.26—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [15] Tang C, Xu Y J, Zhou K, *et al.* Mechanism behind the deterioration in gel properties of collagen gel induced by high-temperature treatments: a molecular perspective[J]. *Food Research International*, 2023, 171: 112985.
- [16] Doyle B B, Bendit E G, Blout E R. Infrared spectroscopy of collagen and collagen-like polypeptides[J]. *Biopolymers*, 1975, 14 (5): 937-957.
- [17] Liang Q F, Wang L, Sun W H, *et al.* Isolation and characterization of collagen from the cartilage of Amur sturgeon (*Acipenser schrenckii*)[J]. *Process Biochemistry*, 2014, 49 (2): 318-323.
- [18] Paschalis E P, Mendelsohn R, Boskey A L. Infrared assessment of bone quality: a review[J]. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 2011, 469 (8): 2170-2178.
- [19] Stani C, Vaccari L, Mitri E, *et al.* FTIR investigation of the secondary structure of type I collagen: new insight into the amide III band[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2020, 229: 118006.
- [20] Webber J L, Gillies G, Krasowska M, *et al.* ATR FTIR spectroscopy of protein and surfactant adsorption to the oil-water interface[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 677: 132330.
- [21] Adamiano A, Scialla S, Carella F, *et al.* Simultaneous extraction of calcium phosphates and proteins from fish bones. Innovative valorisation of food by-products[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 385: 135656.
- [22] Liu D Y, Du L, Huang Q, *et al.* Effects of ultrasound treatment on muscle structure, volatile compounds, and small molecule metabolites of salted *Culter alburnus* fish[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2023, 97: 106440.
- [23] Shi B S, Guo X, Liu H Y, *et al.* Dissecting maillard reaction production in fried foods: formation mechanisms, sensory characteristic attribution, control strategy, and gut homeostasis regulation[J]. *Food Chemistry*, 2024, 438: 137994.
- [24] Zhang J, He S X, Kong F B, *et al.* Size reduction and calcium release of fish bone particles during Nano-milling as affected by bone structure[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2017, 10 (12): 2176-2187.
- [25] Viguet-Carrin S, Garnero P, Delmas P D. The role of collagen in bone strength[J]. *Osteoporosis International*, 2006, 17 (3): 319-336.
- [26] Currey J. 1-The structure and mechanical properties of bone[M]//Kokubo T. Bioceramics and their clinical applications. Cambridge: Woodhead Publishing, 2008: 3-27.
- [27] Li H J, Bai X, Li Y, *et al.* The positive contribution of ultrasound technology in muscle food key processing and its mechanism-a review[J]. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2022: 1-22.
- [28] Guo L N, Zhang X Y, Hong C, *et al.* Application of ultrasound treatment in pork marination: effects on moisture migration and microstructure[J]. *Food Chemistry*, 2024, 447: 138950.

Process and mechanism of softing fish bones of *Ctenopharyngodon idella* by ultrasound-acetic acid treatment

ZHANG Yihan¹, MA Huawei², LUO Yongkang¹, TAN Yuqing¹, HONG Hui^{1*}

(1. College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. China (Guangxi)-ASEAN Key Laboratory of Comprehensive Exploitation and Utilization of Aquatic Germplasm Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangxi Academy of Fishery Sciences, Nanning 530021, China)

Abstract: In 2022, the total freshwater fish production in China reached 2 800.31 million t, accounting for 77.04% of the total domestic fish production. In recent years, against the background of the rapid growth of the ready-to-eat leisure food market in China, a variety of categories of ready-to-eat freshwater fish products have been developed, among which vacuum-packed seasoned fish pieces are one of the mainstream types. However, the processing technology of vacuum-packed seasoned fish pieces still has key technical difficulties, which hinder the development of the industry. The hard fish bones may puncture the packaging bag due to compression during transportation, leading to oil leakage and spoilage, which is the main reason for the high product wastage rate. The presence of large and hard fish bones in the products poses serious food safety hazards, including puncture of the esophagus and damage to organs. The problem of fish bone softening in freshwater fish products needs to be addressed urgently, both from the perspective of production, storage, and transport of the product and from the perspective of food safety. To solve the problem of fish bone softening in ready-to-eat freshwater fish products, the study designed a fish bone softening rate measuring method for ready-to-eat freshwater fish products and then developed the ultrasound-acetic acid (U-CA) fish bone softening technique. The optimal fish bone softening conditions were screened according to the fish bone softening rate and the quality indexes of the fish pieces, and the mechanism of fish bone softening was investigated subsequently. *Ctenopharyngodon idella* pieces were prepared by ultrasonic combined with acetic acid treatment, marination, deep-frying, vacuum packaging, and autoclaving to obtain soft bone fish pieces, whose quality was evaluated by sensory characteristics, pH value, color value, and muscle structure. The fish bone softening rate measuring method was established according to the sensory evaluation and TPA analysis of the standard fish bone samples. The optimal process conditions of U-CA treatment were obtained by evaluating the bone softening rate. Finally, SEM and FTIR were used to analyze the mechanism of fish bone softening of U-CA treatment. The results showed that the fishbone softening rate measuring method we designed can easily and objectively evaluate the degree of fish bone softening in ready-to-eat fish products. After the evaluation of the bone softening rate, sensory evaluation, and other quality indexes, the optimal U-CA treatment conditions were: acetic acid concentration at 1.2% (V/V), ultrasonic power at 120 W, and processing time of 45 min. The fish pieces obtained under these conditions had better bone softening rate, color, texture, and taste. The results of SEM and FTIR showed that U-CA treatment under the optimal process conditions could weaken the bind between collagen and hydroxyapatite, and contribute to the escape of hydroxyapatite. Heat treatment may also disrupt the triple-helical structure of collagen and reduce the hardness and toughness of fish bones. It was shown that U-CA treatment under appropriate conditions could disrupt the original structure of fish bones and effectively soften the fish bones in *C. idella* pieces without affecting the quality of the product. This study provides ideas for the development of freshwater fish bone softening technology and theoretical support for the development of ready-to-eat fish.

Key words: *Ctenopharyngodon idella*; fish bone; fish bone softing process; ultrasound; acetic acid

Corresponding author: HONG Hui. E-mail: hhong@cau.edu.cn

Funding projects: National Key Research and Development Program of China (2022YFD2100902); China Agriculture Research System of MOF and MARA (CARS-45)