



李晴,张志华,刘晓丽,谭雨青,罗永康,洪惠. 蚕豆饲喂脆化养殖对草鱼鱼肉品质的影响[J]. 中国农业大学学报, 2025, 30(07): 174-183.

LI Qing, ZHANG Zhihua, LIU Xiaoli, TAN Yuqing, LUO Yongkang, HONG Hui. Effect of brittleness treatment of broad bean feeding on the muscle quality of grass carp[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(07): 174-183.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.07.15

蚕豆饲喂脆化养殖对草鱼鱼肉品质的影响

李晴¹ 张志华² 刘晓丽² 谭雨青¹ 罗永康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. 河北省水产技术推广总站, 石家庄 050035)

摘要 为较好地评价蚕豆饲喂脆化养殖(简称“蚕豆养殖”)与普通饲料养殖草鱼鱼肉的营品质及特点,对蚕豆养殖和普通养殖草鱼的体色、鱼肉理化指标、体外模拟消化情况及肌肉微观结构进行比较分析。结果表明:1)与普通养殖草鱼相比,蚕豆养殖草鱼的体色偏深黑色,尤其在鳃盖、脊背处鱼鳞和尾鳍处;2)蚕豆养殖草鱼较普通养殖草鱼鱼肉的蛋白质质量分数高10.57%;3)在生鱼肉的感官评价中,蚕豆养殖草鱼鱼肉呈现出更为浓郁的清香味,较少的土腥味和鱼腥味,展现出更高的总体可接受度;在熟鱼肉的感官评价中,蚕豆养殖草鱼鱼肉的质地更加紧实富有弹性,口感脆嫩,色泽均匀,清香味浓郁,土腥味较轻;4)蚕豆养殖草鱼较普通养殖草鱼鱼肉的硬度、胶着性和咀嚼性分别高74.26%、70.90%和70.77%。5)蚕豆养殖草鱼较普通养殖草鱼鱼肉的肌苷酸质量分数高56.33%;6)在蚕豆养殖草鱼鱼肉微观结构横截面中,最大外接直径(d)为50 μm 的肌纤维数量占总肌纤维数量的45.25%, $d \leq 70 \mu\text{m}$ 的肌纤维数量占94.12%。普通养殖草鱼中 $d=50 \mu\text{m}$ 的肌纤维数量占总肌纤维数量的57.85%, $d \leq 35 \mu\text{m}$ 的肌纤维数量占94.20%。与普通养殖草鱼相比,蚕豆养殖草鱼在改变草鱼鱼肉的营品质和感官特性方面具有优势。

关键词 草鱼; 蚕豆; 脆化; 营品质

中图分类号 S917.4

文章编号 1007-4333(2025)07-0174-10

文献标志码 A

Effect of brittleness treatment of broad bean feeding on the muscle quality of grass carp

LI Qing¹, ZHANG Zhihua², LIU Xiaoli², TAN Yuqing¹, LUO Yongkang¹, HONG Hui^{1*}

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

2. Hebei Provincial Fisheries Technology Extension Center, Shijiazhuang 050035, China)

Abstract To evaluate and compare the nutritional quality and characteristics of fish muscle from grass carp fed with broad bean (referred to as "broad bean aquaculture") and ordinary aquaculture, a analysis was conducted to compare the body color, physicochemical properties, *in vitro* digestion, and muscle microstructure between broad bean aquacultured and ordinary aquacultured grass craps. The results showed that: 1) Compared to ordinary aquaculture, grass carp in broad bean aquaculture had darker body color, especially on the gill covers, dorsal fins, scales, and tail fins. 2) The protein content of grass carp in broad bean aquaculture increased by 10.57%, significantly ($P < 0.05$) higher than that of ordinary aquaculture grass carp. 3) In the sensory evaluation of raw fish muscle, grass carp in broad bean

收稿日期: 2024-12-29

基金项目: 现代农业产业技术体系专项资金(CARS-45)

第一作者: 李晴(ORCID:0000-0001-7877-4119),博士研究生,E-mail: bs20233060638@cau.edu.cn

通讯作者: 洪惠(ORCID:0000-0003-3723-3070),教授,主要从事水产品品质调控研究,E-mail: hhong@cau.edu.cn

aquaculture exhibited more stronger fragrance with less earthy and fishy odor, showing higher overall acceptability. In cooked fish muscle, the texture of grass carp in broad bean aquaculture was firmer, more elastic, and tender with uniform color, stronger fragrance, and lighter earthy taste. 4) Compared to grass carp in ordinary aquaculture, the hardness, cohesiveness, and chewiness of the fish muscle from grass carp in broad bean aquaculture increased by 74.26%, 70.90%, and 70.77%, respectively. 5) The inosine monophosphate content of the fish muscle from grass carp in broad bean aquaculture increased by 56.33% compared to grass carp in ordinary aquaculture. 6) In the microstructure cross-section of grass carp in broad bean aquaculture, muscle fibers with a maximum external diameter (d) of 50 μm accounted for 45.25% of the total fibers, and fibers with d less than 70 μm accounted for 94.12%. In the microstructure cross-section of regular farmed grass carp, muscle fibers with d of 50 μm accounted for 57.85% of the total fibers, and fibers with d less than 35 μm accounted for 94.20%. In conclusion, compared to grass carp in ordinary aquaculture, grass carp in broad bean aquaculture offers advantages in improving the nutritional quality and sensory characteristics of grass carp muscle.

Keywords grass carp; broad bean aquaculture; brittleness treatment; nutritional quality

草鱼属于鲤科,是我国“四大家鱼”之一,富含蛋白质和多不饱和脂肪酸,在我国水产养殖业中具有重要地位。2023年我国草鱼的养殖总产量达59.42万t,较2022年增长0.62%,位居淡水鱼类养殖产量之首,占全国所有淡水鱼类养殖总产量的21.44%^[1]。随着人们生活水平的提高,消费者对于草鱼的需求也逐渐从量过渡到质,因此有必要加强对草鱼鱼肉质的调控研究,以满足消费者的需要,同时提升草鱼的养殖效益。

近年来,蚕豆饲喂脆化养殖(简称“蚕豆养殖”)已成为改善鱼肉品质的常用方法^[2]。蚕豆富含蚕豆嘧啶苷和伴蚕豆嘧啶苷是糖苷氨基嘧啶衍生物,这2种化合物在体内代谢后可生成活性氧(ROS),具有促氧化作用。草鱼摄食蚕豆后,体内ROS水平升高,导致肌肉蛋白之间的相互作用受损,并干扰胶原蛋白的正常周转,影响肌肉组织的稳定性。为了应对这种氧化应激,草鱼会进行代偿性代谢,包括减少运动、降低糖代谢水平,并将肌肉中的脂肪转移至腹腔储存。这些变化使肌肉质地更加坚实和有韧性,形成所谓的“脆肉鲩”^[3]。侯燕芳^[4]研究了使用单一蚕豆饵料对草鱼进行175 d催化处理后的品质变化,结果表明蚕豆养殖草鱼鱼肉的硬度、粘性、弹性、胶着性和咀嚼性等指标均显著($P<0.05$)提高,肌原纤维束间距增大,直径变粗,风味成分也发生了明显变化。同样,已有研究表明催化处理(投喂含有10%蚕豆的复合饲料)草鱼110~130 d后,鱼肉肌纤维面积增大了39%,同时鱼肉的硬度和咀嚼性显著($P<0.05$)提高^[5]。因此,蚕豆养殖能

够改善鱼肉的质构特性。从市场角度看,这一特性使得草鱼拥有独特的口感,适用于火锅、煎炸及刺身等多种烹饪方式,未来在高端超市、连锁餐饮品牌及预制菜行业具有广阔的市场应用空间。

本研究拟以色泽、持水力、感官评价、营养组分、氨基酸和肌苷酸质量分数、水分分布、蛋白质消化率、相对分子质量分布和肌纤维直径等为评价指标,分析蚕豆养殖和普通养殖草鱼的鱼肉品质差异,旨在全面了解不同养殖技术下草鱼鱼肉的品质特点。

1 材料与方法

1.1 试验材料

草鱼蚕豆养殖与普通养殖试验于2024年08—11月在河北省邢台市临城县碧水源家庭农场进行,试验期间未出现死鱼现象,养殖成活率为100%。11月11日试验结束时草鱼平均规格为4.8 kg/尾,总产量1 056 kg,平均 hm^2 产量3 166.42 kg。草鱼养殖技术见表1。

蚕豆养殖草鱼与普通养殖草鱼的品质检测试验于2024年12月在中国农业大学食品科学与营养工程学院进行。

胰蛋白酶、胃蛋白酶、氨基酸及肌苷酸标准品购自美国Sigma-Aldrich公司;异硫氰酸苯酯、高氯酸、浓硫酸、盐酸、氨水、氢氧化钠、氯化钠、三乙胺均为分析纯,购自国药集团化学试剂有限公司;甲醇、乙醇、乙腈为色谱纯,购自美国Fisher Scientific公司。

表1 草鱼养殖技术
Table 1 Technology of grass carp aquaculture

技术 Technology	内容 Content
池塘准备 Pond preparation	蚕豆养殖草鱼的试验池塘采用水泥池塘,面积为0.03 hm ² ,水深1.5 m,水源来自岐山湖水系直流水。对照池塘为投喂颗粒饲料的普通池塘。
水温调整 Water temperature adjustment	8月18日上午,天气晴朗。调节试验池塘和对照池塘水温均维持在(26±3)℃。
草鱼捕捞与投放 Grass carp fishing and stocking	从对照池塘捕捞草鱼220尾,平均规格为4 kg/尾,投放入试验池塘。
应激管理与诱食 Stress management and feeding inducement	草鱼入试验池塘当天使用“泼洒姜”抗应激。从第2天起投喂颗粒饲料诱食。8月26日,80%以上的草鱼开始正常进食。
蚕豆浸泡与投喂 Broad bean soaking and feeding	8月28日,用井水浸泡蚕豆16 h至膨胀并可掰断。从8月29日起,每天分2次于试验池塘投喂蚕豆。共计投喂蚕豆75 d,总投喂量900 kg,饵料系数为5.1。
水质管理 Water quality management	试验池塘为活水塘,水源来自岐山湖水系直流水,池塘每日更换水量为总水量的30%。
鱼病防治 Fish disease prevention and control	草鱼投放入试验池塘之前用伊维菌素进行杀虫处理,次日用复合碘消毒处理池塘水,水质保持良好,鱼体健康。

1.2 仪器及设备

FE-20 pH计,上海梅特勒托利多科技有限公司;LC-16高效液相色谱仪,日本Shimadzu公司;TGL16A冷冻离心机,长沙平凡仪器仪表有限公司;NR110手持色差仪,深圳市三恩时科技有限公司;SM-28-10马弗炉,天津市华北试验电炉厂;KDY9820凯氏定氮仪,北京通润源机电仪器设备公司;拍摄箱ZJSYP80CM,深圳新视野摄影设备有限公司;智能手机iPhone 13 Pro Max,美国苹果公司;LF-NMR分析仪PQ001,宁波纽迈电子科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品处理

选择蚕豆养殖和普通养殖的草鱼各3条,采用活体运输方式运至试验室。鱼样到达后,敲晕、拍照、称重、测量体长、去鳞、剖腹、去内脏,分割出背部肉进行理化试验。

1.3.2 图像采集

图像采集装置包括拍摄设备箱、2条功率15 W的LED灯带以及浅灰色背景板。使用智能手机拍摄图像,手机相机分辨率为1 200万像素,配备2倍光学变焦,广角镜头光圈值为1.5,长焦镜头光圈值为2.8。手机安装在距拍摄设备箱底部70 cm的正上方,拍摄图像的分辨率为4 320像素×3 024像

素,并保存为JPG格式。

1.3.3 色泽

使用NR110手持色差仪对草鱼背部肉进行颜色测定。将色差仪测量孔对准草背部肉的3个随机位置,进行3次重复测定,取平均值作为草鱼背部肉的测量值,结果包括亮度值、红度值、黄度值和白度值。

1.3.4 持水力

取草鱼背部肉切成1 cm×1 cm×1 cm的鱼块,称重后置于85℃的水浴锅中蒸煮15 min;取出后待鱼块恢复至室温,擦去鱼肉表面水分后再称重并记录。持水力(WHC, Water holding capacity)计算公式为:

$$WHC = 100\% - \frac{(W_0 - W_1)}{W} \times 100\%$$

式中:W₀和W₁分别为蒸煮前后鱼块的质量,g。

1.3.5 感官评价

感官评价参考梁释介等^[6]的方法。由11名(5男6女)经过培训的试验室成员进行。每位评价员分别对生鲜和蒸煮后的草鱼鱼肉进行感官评估。生鲜鱼肉的评价指标包括质地、色泽、清香味、土腥味、鱼腥味和总体接受度;蒸煮后鱼肉的评价指标包括质地、口感、色泽、清香味、土腥味、熟肉味、汤汁浑浊度和总体接受度。所有指标均采用1~5分

制评分,分数越高表示指标表现越好或气味越强。

1.3.6 营养成分

粗蛋白含量用凯氏定氮法进行测定,水分含量用高温干燥法进行测定,灰分含量用马弗炉法进行测定^[7-9]。粗脂肪含量采用 Bligh 等^[10]的方法进行测定。

1.3.7 氨基酸组成、肌苷酸和相对分子质量测定

采用梁释介等^[6]的方法测定草鱼鱼肉中的氨基酸组成、肌苷酸质量摩尔浓度和相对分子质量的测定。

1.3.8 体外模拟消化

取 10 g 绞碎的鱼肉样品,加入 100 mL 去离子水,高速匀浆 10 s。接着使用 6 mol/L 盐酸调节溶液的 pH 至 2.0,随后加入 1 g 胃蛋白酶。该混合液被置于恒温振荡水浴锅中,升温至 37 °C,以 150 r/min 的速度模拟胃消化 1 h。反应结束后,使用 2 mol/L 氢氧化钠将溶液 pH 调至 8.0 终止反应,并加入 1 g 胰蛋白酶。再次将混合液放入 37 °C 恒温振荡水浴锅中,以 150 r/min 的速度模拟肠道消化 2 h。消化完成后,立即将混合液置于 95 °C 水浴锅中 10 min 完成灭酶,并冷却至室温。之后,采用 10 000 r/min 离心 5 min 分离上清液和沉淀物。将沉淀物进行冻干处理后测定其粗蛋白质量分数。蛋白质消化率(Protein digestibility, PD)计算公式如下:

$$PD = \frac{M_0 - M_1}{M_0} \times 100\%$$

式中: M_0 和 M_1 分别为鱼肉消化前后的粗蛋白质质量,g。

1.3.9 低场核磁共振

根据 Liang 等^[11]的研究,使用 LF-NMR 分析仪测量草鱼鱼块的水分分布情况。在测试前,分析仪预热 12 h,并使用参考油样进行校准。取草鱼背部肉切成 1 cm × 1 cm × 1 cm 的立方体,塑料膜覆盖后放置于测试管中。分析过程采用 Carr-Purcell-Meiboom-Gill 序列,在 32 °C 下定量弛豫。脉冲参数设置如下:频率为 18 MHz,频谱宽度为 100 kHz,射频延迟时间 0.08 ms,90 和 180 °C 的脉冲宽度分别为 5 和 9 s,等待时间 5 000 ms,回波数 12 000,扫描次数 16。

1.3.10 质构

参照 Gao 等^[12]的方法,使用配备 TA3/100 方形探头的质构分析仪测量草鱼鱼块的硬度、内聚性、

弹性、胶着性和咀嚼性。取草鱼背部肉切成 2 cm × 2 cm × 1.5 cm 的立方体,放置于质构分析仪平台中央进行测定。测定过程中,鱼块将被压缩 2 次,压缩间隔 5 s,触发负荷 3 g,形变量 30%,测试速度 1 mm/s。

1.3.11 微观结构和肌纤维密度

参考 Li 等^[13]的方法完成草鱼肉微观结构和肌纤维密度的测量。取草鱼背部肉切成 2 cm × 2 cm × 2 cm 的立方体,置于质量分数为 4% 的福尔马林溶液中固定 24 h,对固定后的样品进行石蜡包埋、切片、脱蜡和苏木精-伊红染色处理。染色完成后,采用显微镜观察切片的组织结构,使用 Image J 软件计算肌纤维的最大外接直径。

1.4 统计分析

试验结果采用 SPSS 17.0 软件进行统计分析,显著性检验采用独立样本 T 检验,在 $P < 0.05$ 水平上为显著。使用 EXCEL 2021 绘图。每组试验平行测定 3 次,结果以“平均值 ± 标准差”表示。

2 结果与分析

2.1 体色

相比普通养殖草鱼,蚕豆养殖草鱼的鱼头鳃盖和背脊部鱼鳞呈现出深黑色和暗灰色,背侧鳞片展现出金色光泽,尾部鱼鳞的颜色呈深黑色。而普通养殖草鱼的体色更多呈现出平和的金黄色光泽,尾部鱼鳞略带紫色或暗灰色。

2.2 色泽及持水力

蚕豆养殖草鱼鱼肉的亮度值、红度值、黄度值、白度值、持水力均高于普通养殖草鱼,但这些差异并未达到显著水平($P > 0.05$)。

2.3 营养成分

蚕豆养殖草鱼鱼肉的蛋白质质量分数显著($P < 0.05$)高于普通养殖草鱼(表 2)。此外,蚕豆养殖草鱼鱼肉的水分质量分数和脂肪质量分数低于普通养殖草鱼,而灰分质量分数高于普通养殖草鱼,但这些差异均未达到显著性水平($P > 0.05$)。

2.4 感官评价

与普通养殖草鱼生鱼肉相比,蚕豆养殖草鱼生鱼肉呈现出更为浓郁的清香味,较少的土腥味和鱼腥味,整体可接受度更高(图 1(a))。此外,蚕豆养殖草鱼熟鱼肉质更加紧实富有弹性,口感更加脆嫩,色泽均匀,视觉效果优于普通养殖草鱼,清香味

表2 蚕豆养殖和普通养殖草鱼基本营养成分的质量分数

Table 2 Mass fraction of basic nutritional components of grass carp cultured with broad bean and ordinary feeds

养殖模式 Aquaculture model	水分 Moisture	蛋白质 Protein	脂肪 Lipid	灰分 Ash
蚕豆养殖 Broad bean aquaculture	75.75±1.36a	19.86±0.61a	0.46±0.08a	1.17±0.11a
普通养殖 Ordinary aquaculture	76.87±0.19a	17.76±0.35b	0.54±0.05a	1.05±0.04a

注:同列数据不同字母表示差异显著($P<0.05$),相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。下表同。
Note: Within the same column, different letters represent significant differences ($P<0.05$), while the same letters represent no significant differences ($P>0.05$). The same below.

浓郁,土腥味较轻,表现出更鲜美的味道(图1(b))。体感官评价仍显示蚕豆养殖草鱼的鱼肉质量更为优越。

尽管熟肉味和汤汁的浑浊度的评分相对较高,但整

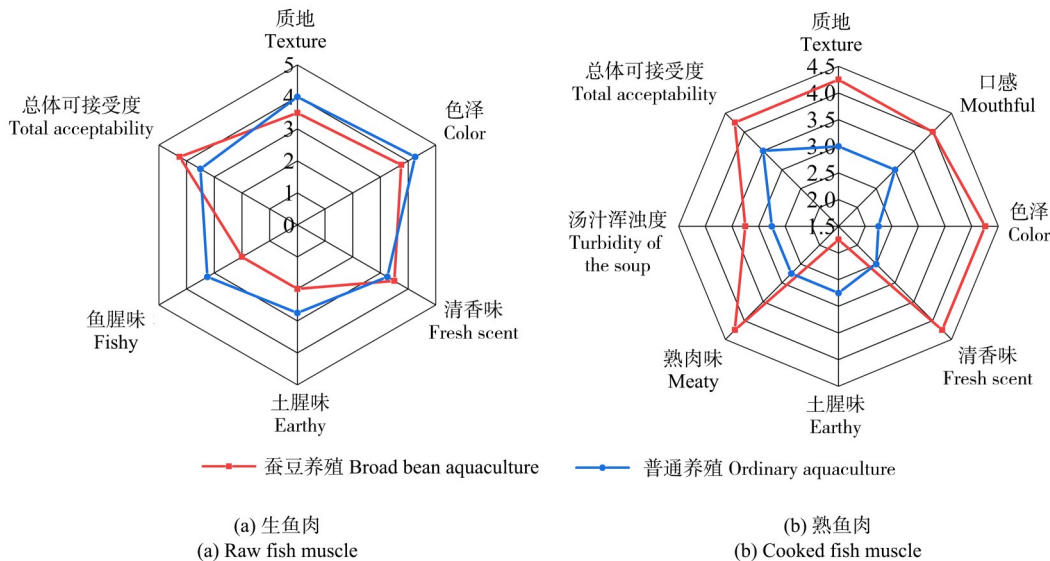


图1 蚕豆养殖与普通养殖草鱼生、熟鱼肉感官评价雷达图

Fig. 1 Radar chart of sensory evaluation of raw and cooked grass carp muscle cultured with broad bean and ordinary feeds

2.5 质构

而内聚性显著降低($P<0.05$)。其中,蚕豆养殖草鱼鱼肉的硬度、胶着性和咀嚼性的分别提高74.26%、70.90%和70.77%(表3)。

与普通养殖草鱼相比,蚕豆养殖草鱼鱼肉的硬度、弹性、胶着性和咀嚼性均显著($P<0.05$)提高,

表3 蚕豆养殖和普通养殖草鱼鱼肉的质构参数

Table 3 Texture parameters of grass carp cultured with broad beans and ordinary feeds

养殖模式 Aquaculture model	硬度/N Hardness	内聚性 Cohesion	弹性/mm Elasticity	胶着性/N Adhesion	咀嚼性/mJ Chewability
蚕豆养殖 Broad bean aquaculture	24.51±2.59a	0.56±0.09a	4.16±0.49a	13.61±1.60a	57.14±13.23a
普通养殖 Ordinary aquaculture	6.31±0.38b	0.63±0.03b	4.20±0.20b	3.96±0.28b	16.70±1.95b

2.6 氨基酸组成

蚕豆养殖和普通养殖草鱼鱼肉的氨基酸的质量分数见表 4:蚕豆养殖草鱼鱼肉的甲硫氨酸质量分数和总氨基酸质量分数显著($P<0.05$)高于普通养殖草鱼,其他氨基酸组成没有显著性差异($P>0.05$)。

表 4 蚕豆养殖和普通养殖草鱼的氨基酸的质量分数
Table 4 Mass fraction of amino acid composition of grass carp cultured with broad beans and ordinary feeds

质量分数 Mass fraction			质量分数 Mass fraction		
氨基酸 Amino acid	蚕豆养殖 Broad bean aquaculture	普通养殖 Ordinary aquaculture	氨基酸 Amino acid	蚕豆养殖 Broad bean aquaculture	普通养殖 Ordinary aquaculture
天冬氨酸 Aspartic acid	0.04±0.02a	0.02±0.01a	酪氨酸 Tyrosine	0.74±0.08a	0.65±0.09a
丝氨酸 Serine	0.80±0.11a	0.74±0.13a	缬氨酸 Valine	1.07±0.13a	0.86±0.03a
甘氨酸 Glycine	0.25±0.06a	0.21±0.03a	甲硫氨酸 Methionine	0.68±0.05a	0.50±0.01b
组氨酸 Histidine	0.93±0.16a	0.79±0.07a	异亮氨酸 Isoleucine	1.21±0.13a	1.04±0.15a
精氨酸 Arginine	1.67±0.26a	1.48±0.18a	亮氨酸 Leucine	1.66±0.18a	1.48±0.28a
苏氨酸 Threonine	1.33±0.13a	1.24±0.14a	苯丙氨酸 Phenylalanine	0.81±0.00a	0.82±0.02a
脯氨酸 Proline	1.18±0.21a	0.90±0.07a	赖氨酸 Lysine	1.86±0.23a	1.58±0.26a
丙氨酸 Alanine	1.58±0.23a	1.54±0.23a	总氨基酸 Total amino acid	14.68±0.01a	12.84±0.6b

2.7 肌苷酸质量分数

蚕豆养殖草鱼鱼肉的肌苷酸质量分数为 2.29 mg/g,显著($P<0.05$)高于普通养殖草鱼鱼肉,表明蚕豆养殖会提高草鱼鱼肉的鲜度。

2.8 模拟消化后蛋白质消化率及相对分子质量分布

蚕豆养殖草鱼和普通养殖草鱼鱼肉的蛋白质消化率分别为 97.01% 和 96.28%。蚕豆养殖草鱼鱼肉较普通养殖草鱼鱼肉的消化率高 0.75%,但是二者之间没有显著性差异($P>0.05$)。进一步分析消化后蚕豆养殖和普通养殖草鱼鱼肉的相对分子质量(Mr)分布(图 2)发现,Mr 为 1 000~2 000 的消化产物比例最高,Mr<5 000 的消化产物分别为 91.44% 和 90.69%,两者没有显著差异($P>0.05$),表明蚕豆养殖不会对草鱼鱼肉的蛋白质消化率和体外消化特性产生较大影响。

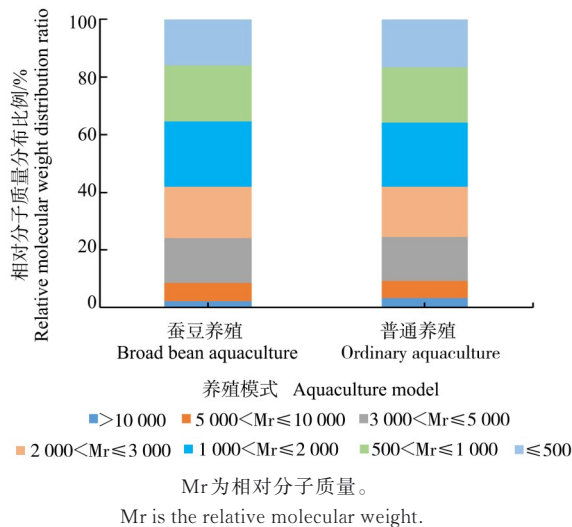


图 2 蚕豆养殖与普通养殖草鱼鱼肉经体外模拟消化后相对分子质量分布

Fig. 2 Relative molecular mass distribution of grass carp muscle cultured with broad beans and ordinary feeds after simulated *in vitro* digestion

2.9 低场核磁

根据横向弛豫时间(t),可以将水分类型划分为以下3种: $t=1\sim10\text{ ms}$ 为结合水, $t=10\sim100\text{ ms}$ 为固定水, $t=100\sim1\,000\text{ ms}$ 为自由水,这些水分类型的信号峰值和峰面积可以反应肌肉体系中水分的迁移特性,揭示其对肉质保水性、结构稳定性和多汁性的影响^[2]。

图3示出蚕豆养殖与普通养殖草鱼鱼肉中的水分分布,相比于普通养殖草鱼,蚕豆养殖草鱼鱼肉的结合水和固定水的峰面积增加,尤其是固定水增加较为明显。

2.10 微观结构及肌纤维直径

蚕豆养殖草鱼与普通养殖草鱼鱼肉的肌纤维微观结构和直径分布见图4。在鱼肉肌纤维结构方面,

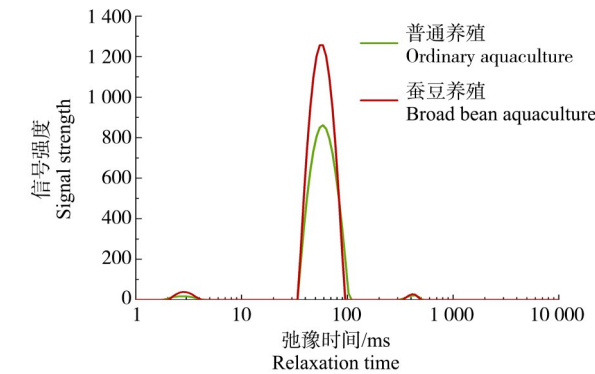


图3 蚕豆养殖与普通养殖草鱼鱼肉中的水分分布
Fig. 3 Water distribution of grass carp cultured with broad beans and ordinary feeds

蚕豆养殖草鱼鱼肉的肌纤维间隙和横截面积均大于普通养殖草鱼。为进一步量化肌纤维直径的变

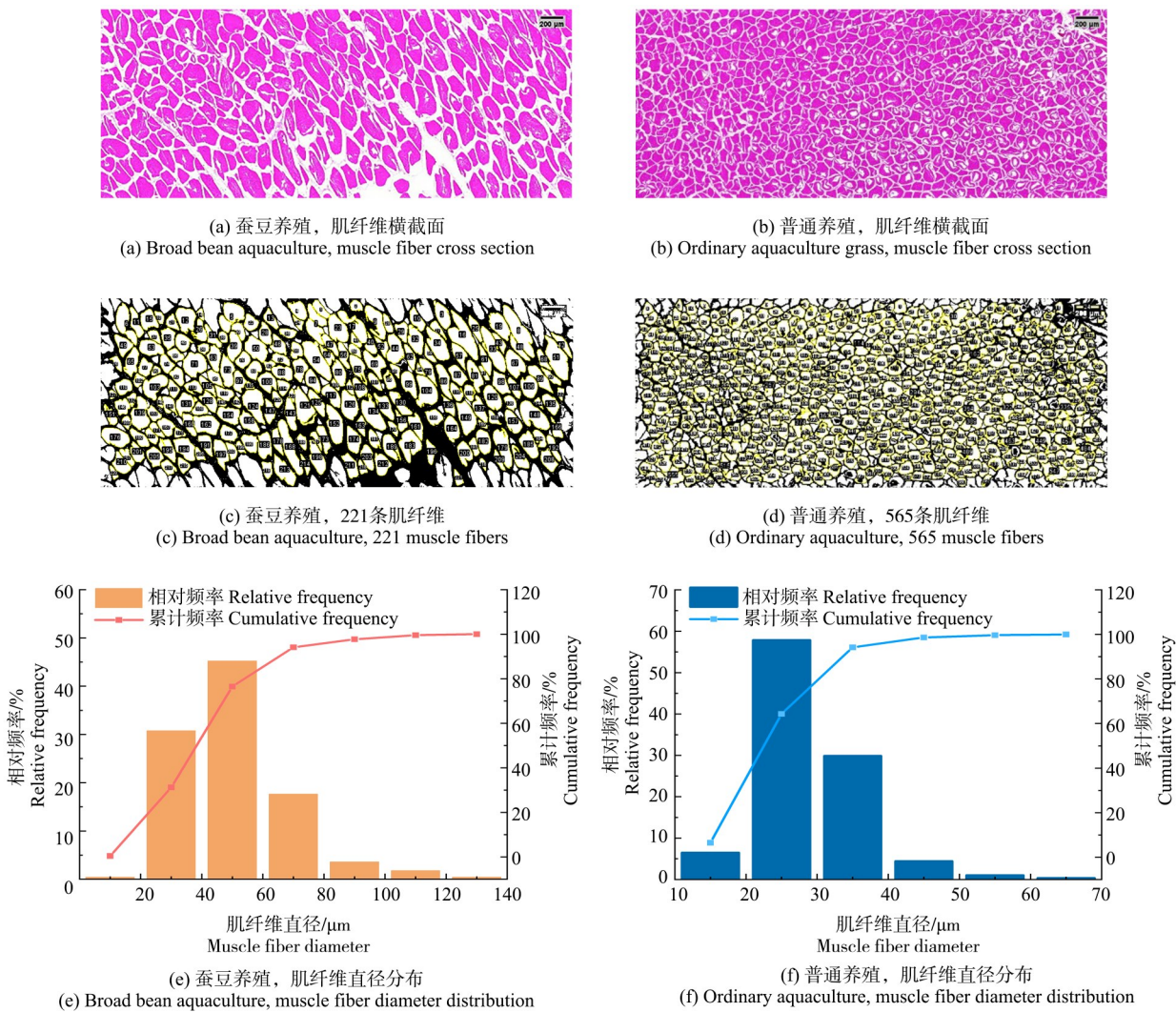


图4 蚕豆养殖草鱼与普通养殖草鱼鱼肉的肌纤维微观结构和直径分布

Fig. 4 Fiber microstructure and diameter distribution of grass carp muscle cultured with broad beans and ordinary feeds

化,分别对蚕豆养殖草鱼和普通养殖草鱼肌纤维横截面中的221条和565条肌纤维进行最大外接直径测量。测量结果表明,在蚕豆养殖草鱼鱼肉微观结构横截面中,最大外接直径(d)为50 μm 的肌纤维数量占总肌纤维数量的45.25%, $d \leq 70 \mu\text{m}$ 的肌纤维数量占总纤维数量的94.12%。普通养殖草鱼鱼肉微观结构横截面中, d 为50 μm 的肌纤维数量占总肌纤维数量的57.85%, $d \leq 35 \mu\text{m}$ 的肌纤维数量占总纤维数量的94.20%。

3 讨论与结论

3.1 蚕豆养殖对草鱼体色及颜色和气味的影响

蚕豆养殖的草鱼体色偏深黑色,这种颜色的变化可能与蚕豆饲料中的色素的吸收有关。此外,岐山湖优良的水质环境也可能间接影响草鱼的摄食量和能量转化率,从而导致特征体色的形成,使蚕豆养殖草鱼在外观上具有一定的吸引力,特别是在市场中强调高品质和独特性的情况下。

在鱼肉感官方面,蚕豆养殖草鱼鱼肉的亮度值、红度值、黄度值、白度值、持水力均高于普通养殖草鱼,这表明蚕豆养殖草鱼鱼肉的外观呈现更好的视觉效果,其在色泽和肉质上的提高可能是一个趋势。除了颜色,在生鱼肉和熟鱼肉的感官评价分析中,蚕豆养殖草鱼的鱼肉都呈现出更为浓郁的清香味,较少的土腥味和鱼腥味,展现出更高的总体可接受度。蚕豆含有的黄酮类和皂甙类等物质可通过抵抗脂肪氧化和调节鱼体代谢,从而减少腥味物质的产生和积累,进而减轻鱼肉的土腥味和鱼腥味^[14]。同时,蚕豆特有的芳香物质可以赋予鱼肉更为清香的风味,增强其整体感官评价。冯静^[15]的研究发现蚕豆养殖会导致的草鱼鱼肉中与鱼腥味形成相关的壬醛和2,3-辛二酮的相对含量分别减少5.45%和12.71%,而已醛增加65.52%,因此草鱼脆化后清香味的主要来源可能归因于己醛的大量积累和脂肪风味。

3.2 蚕豆养殖对草鱼营养组成、质构及肌纤维的影响

本研究结果表明,蚕豆养殖草鱼与普通养殖草鱼相比,鱼肉蛋白质质量分数和固定水质量分数较高,水分质量分数和脂肪质量分数较低,这表明蚕豆添加进饲料中可以影响草鱼鱼肉的营养价值,尤其是在蛋白质方面。这一效果可能归因于蚕豆适

量添加抑制了其抗营养因子的合成,如蛋白酶抑制剂、缩合单宁、植酸和嘧啶核苷等,从而增加了精氨酸和赖氨酸等必需氨基酸的质量分数,促进了相关蛋白质的合成和沉积^[16-17]。此外,低脂肪质量分数和水分质量分数增强了鱼肉肌束之间的摩擦力,从而增强了鱼肉的咀嚼性,这一结果与魏士卜^[18]的研究结论一致。

本研究表明蚕豆养殖草鱼鱼肉的硬度、弹性、胶着性和咀嚼性均显著($P < 0.05$)高于普通养殖草鱼鱼肉。硬度的提高可能与肌纤维和胶原蛋白的过度表达密切相关。在蚕豆养殖草鱼的肌肉中,上调基因主要集中在与肌成纤维细胞增殖、细胞因子产生和营养代谢相关的功能群中。特别是肌源性调节因子(myod、myog、myf5和mrf4)的显著上调,直接促进了肌纤维的生长和细胞外基质的沉积。这些因子可能通过加强肌纤维和细胞外基质的交联,增强了鱼肉的硬度和弹性,并改善了质构和脆化特性。姜维波^[19]的研究表明,蚕豆养殖草鱼鱼肉中的I型胶原蛋白COL1A1和COL1A2基因的mRNA和蛋白表达量显著($P < 0.05$)高于普通养殖草鱼。胶原蛋白与肌肉组织结构、柔韧性和质地紧密联系,能够影响肌肉的持水能力和咀嚼性,从而提高鱼肉的机械强度。

蚕豆养殖草鱼鱼肉的肌苷酸质量分数显著($P < 0.05$)高于普通养殖草鱼鱼肉意味着草鱼能在捕捞后保持更长时间的鲜美口感^[15]。本研究中,蚕豆养殖草鱼的肌纤维微间隙和横截面积均大于普通养殖草鱼的肌纤维,表明蚕豆饲喂对草鱼肌纤维结构产生了较大的影响。蚕豆养殖使草鱼鱼肉肌纤维直径增大约2倍,这一变化趋势与甘甘露等^[6]关于草鱼脆化处理后肌纤维增大研究的结果一致。肌纤维由肌原纤维蛋白构成,而肌原纤维蛋白是鱼肉的主要成分,肌纤维直径增大说明肌原纤维蛋白质量分数增加,这与蚕豆养殖草鱼蛋白质质量分数高的结果相符。杜瑞雪等^[20]的研究进一步指出,肌纤维的粗细与鱼肉的支撑能力密切相关,支撑能力的增强直接影响鱼肉的硬度,这与质构和感官结果一致。

蚕豆养殖草鱼在蛋白质质量分数、鲜度和感官品质上优于普通养殖草鱼,且体外模拟消化结果表明蚕豆养殖的草鱼鱼肉不会对消化产生影响。因此,蚕豆养殖技术在提高草鱼鱼肉的营养品质和感

官特性方面具有明显优势。

参考文献 Reference

- [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[M]. 北京:中国农业出版社, 2024:24-25
Fisheries and Fisheries Administration Bureau of Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. *China Fisheries Statistical Yearbook* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2024: 24-25 (in Chinese)
- [2] 冯静,林婉玲,李来好,杨贤庆,王锦旭,黄卉,胡晓,郝淑贤,吴燕燕. 蚕豆对鱼类脆化的影响研究进展[J]. 食品工业科技, 2016,37(14):395-399
Feng J, Lin W L, Li L H, Yang X Q, Wang J X, Huang H, Hu X, Hao S X, Wu Y Y. Advances in effects of broad bean on brittleness in fish[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2016, 37(14): 395-399 (in Chinese)
- [3] Yu E M, Fu B, Wang G J, Li Z F, Ye D W, Jiang Y, Ji H, Wang X, Yu D G, Ehsan H, Gong W B, Zhang K, Tian J J, Yu L Y, Hu Z Y, Xie J, Kaneko G. Proteomic and metabolomic basis for improved textural quality in crisp grass carp (*Ctenopharyngodon idellus* C. et V) fed with a natural dietary pro-oxidant[J]. *Food Chemistry*, 2020, 325: 126906
- [4] 侯燕芳. 脆肉鲩鱼肉品质控制关键技术的研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2017
Hou Y F. Study on key technologies for quality control of crisp grass carp meat[D]. Nanchang: Nanchang University, 2017 (in Chinese)
- [5] 甘承露. 脆肉鲩肌肉特性及其贮藏稳定性的研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2010
Gan C L. Study on muscle characteristics and storage stability of crisp meat carp [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010 (in Chinese)
- [6] 梁释介,丁宁,冯淳淞,闫有利,罗永康. 河流网箱养殖与池塘养殖鲤鱼营养及品质评价[J]. 中国农业大学学报,2023,28(5): 154-162
Liang S J, Ding N, Feng C S, Yan Y L, Luo Y K. Nutrition and quality evaluation of carps cultured in rive-cages and ponds[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(5): 154-162 (in Chinese)
- [7] GB/T 5009—2016 食品中蛋白质的测定[S]. 北京:中国标准出版社,2017
GB/T 5009—2016 Determination of protein in food [S]. Beijing: China Standard Press, 2017 (in Chinese)
- [8] GB/T 5009—2016 食品中水分的测定[S]. 北京:中国标准出版社,2017
GB/T 5009—2016 Determination of moisture in food[S]. Beijing: China Standard Press, 2017 (in Chinese)
- [9] GB/T 5009—2016 食品中灰分的测定[S]. 北京:中国标准出版社, 2017
GB/T 5009—2016 Determination of ash in food [S]. Beijing: China Standard Press, 2017 (in Chinese)
- [10] Bligh E G, Dyer W J. A rapid method of total lipid extraction and purification [J]. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 1959, 37(8): 911-917
- [11] Liang Y F, Xie Y Y, Li D P, Luo Y K, Hong H. Dynamics of water mobility, salt diffusion and hardness changes in bighead carp fillets during low-salting[J]. *LWT*, 2021, 135: 110033
- [12] Gao S, Liu Y Y, Fu Z X, Zhang H J, Zhang L T, Li B, Tan Y Q, Hong H, Luo Y K. Uncovering quality changes of salted bighead carp fillets during frozen storage: The potential role of time-dependent protein denaturation and oxidation[J]. *Food Chemistry*, 2023, 414: 135714
- [13] Li Q, Wen X Y, Liang S J, Sun X Y, Ma H W, Zhang Y H, Tan Y Q, Hong H, Luo Y K. Enhancing bighead carp cutting: Chilled storage insights and machine vision-based segmentation algorithm development [J]. *Food Chemistry*, 2024, 450: 139280
- [14] 沈冠超. 蚕豆中肉质脆化活性成分的提取及应用[D]. 福州: 福建农林大学, 2014
Shen G C. Extraction and application of meat embrittlement active components from broad bean [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2014 (in Chinese)
- [15] 冯静. 脆肉鲩脆性形成过程中肌肉蛋白结构及风味成分变化研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2017
Feng J. Study on the changes of muscle protein structure and flavor components during the brittleness formation of crisp meat carp [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2017 (in Chinese)
- [16] 符兵,彭凯,赵红霞,陈冰,王国霞,曹俊明,黄文. 鱼类脆化作用机理的研究进展[J]. 饲料研究,2023,46(3):140-143
Fu B, Peng K, Zhao H X, Chen B, Wang G X, Cao J M, Huang W. Research progress on the mechanism of fish embrittlement [J]. *Feed Research*, 2023, 46(3): 140-143 (in Chinese)
- [17] 闫竣萌,肖斯立,刘巧瑜,白卫东,吴霆,王青秀,杨灵,欧柏桥. 脆化处理对罗非鱼肌肉品质调控作用[J/OL]. 食品工业科技,1-17
Yan J M, Xiao S L, Liu Q Y, Bai W D, Wu T, Wang Q X, Yang L, Ou B Q. Regulation of muscle quality of tilapia by crisping treatment[J/OL]. *Science and Technology of Food Industry*, 1-17 (in Chinese)
- [18] 魏士卜. 富含蚕豆的饲料对吉富罗非鱼生长及肉质脆化的影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2022
Wei S B. Effects of feed rich in broad beans on growth and meat embrittlement of *Giffordshire tilapia*[D]. Chongqing: Southwest University, 2022 (in Chinese)
- [19] 姜维波. 蚕豆、豌豆对草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)生长性能和肌肉品质的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019
Jiang W B. Effects of broad bean and peas on growth performance and muscle quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019 (in Chinese)
- [20] 杜瑞雪,叶元土,张玮岚,肖旭全,吴韬. 循环水系统短期禁食改善草鱼和斑点叉尾鲴肌肉品质[J]. 中国渔业质量与标准,2023,13(5):17-30
Du R X, Ye Y T, Zhang W L, Xiao X Q, Wu T. Short-term fasting in the circulating water system improves the food quality of grass carp

(*Ctenopharyngodon idella*) and channel catfish (*Ictalurus punctatus*)

Chinese)

[J]. *Chinese Fishery Quality and Standards*, 2023, 13(5): 17-30 (in

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 李晴,女,中国农业大学食品科学与营养工程学院食品科学与工程专业2023级硕博连读生,专业为食品科学与工程,研究方向为鳙鱼的精细分割及分割产品品质控制研究。就读期间以第一作者身份发表SCI论文4篇、中文文章2篇,参与国家重点研发计划(2022YFD2100901)、现代农业产业技术体系专项(CARS-45)、国家重点研发计划蓝色粮仓项目(2018TFD0901001)。2次获得中国农业大学博士一等学业奖学金。



通讯作者简介: 洪惠,中国农业大学食品科学与营养工程学院教授、博士、博士生导师。国家大宗淡水鱼产业技术体系质量安全与营养品质评价岗位专家,北京水产学会理事, *Food Science of Animal Products*、《肉类研究》编委。长期从事水产品加工与贮藏工程,动物蛋白质资源高值化利用,水产品品质控制与营养健康,生物活性肽的开发与功能评价等方面的教学科研工作。主持完成国家自然科学基金和重点研发项目7项,授权专利3项,在国际主流期刊上发表论文200余篇,其中以第一作者或通讯作者共发表论文61篇,发表论文总引用6 000余次,入选2022、2023年《全球2% 顶尖科学家》榜单。