



脆肉尼罗罗非鱼与普通尼罗罗非鱼肌肉 理化与营养特性的比较

谢曦¹, 翟笑倩², 黎烽², 邓建朝³, 杨贤庆³, 梁少文⁴, 寇红岩²,
黄垚², 刘华清⁵, 李文卫⁵, 李清清^{2*}, 林鑫^{2,6*}

(1. 仲恺农业工程学院轻工食品学院, 广东广州 510225;

2. 仲恺农业工程学院动物科技学院, 广东省水环境与水产品安全工程技术研究中心,
广州市水禽健康养殖与水产动物疾病重点实验室, 广东广州 510225;

3. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东广州 510300;

4. 广东优配供应链管理有限公司, 广东中山 528400;

5. 广州市花都区农业农村局, 广东广州 510800;

6. 广州市花都区仲花现代农业研究院, 广东广州 510800)

摘要: 为揭示脆肉尼罗罗非鱼与普通尼罗罗非鱼的肌肉理化与营养特性的差异, 实验对脆肉尼罗罗非鱼与普通尼罗罗非鱼肌肉在质构特性、感官评价、基本化学成分、脂肪酸分布和游离氨基酸组成等方面进行比较研究。结果显示, 脆肉尼罗罗非鱼肉的硬度、弹性和咀嚼性与普通尼罗罗非鱼差异显著; 脆肉尼罗罗非鱼肌肉中的粗蛋白和灰分与普通尼罗罗非鱼无显著差异, 但水分含量显著降低, 总脂含量显著升高; 脂肪酸组成分析显示, 脆肉尼罗罗非鱼肌肉中所含的多不饱和脂肪酸显著高于普通尼罗罗非鱼, 其中亚油酸、二十碳五烯酸和二十二碳六烯酸分别是对照组的 2.12、3.36 和 3.71 倍, 脆肉尼罗罗非鱼肌肉的游离必需氨基酸总量显著高于普通尼罗罗非鱼, 但鲜味氨基酸中甘氨酸略低于普通尼罗罗非鱼。研究表明, 脆肉尼罗罗非鱼和普通尼罗罗非鱼肌肉在质构特性、含水量、脂肪酸含量和游离氨基酸分布上都存在显著差异。本实验为脆肉尼罗罗非在养殖技术优化、脆化饲料研发、保鲜和加工技术改进等方面提供可参考的研究数据和技术资料。

关键词: 脆肉尼罗罗非鱼; 脆性; 质构特性; 感官评价; 营养特性

中图分类号: S 963

文献标志码: A

尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 原产于非洲, 属于鲈形目 (Perciformes) 淡水鱼类, 食性杂、生长快、适应性强、疾病少、产量高、营养价值高, 是联合国粮农组织推荐的优良养殖品种, 在热带和亚热带淡水地区广泛养殖^[1-2]。我国是罗非

鱼养殖大国, 养殖产量占全球养殖产量的 40%, 是我国出口量最大的淡水养殖品种。然而, 近年来随着罗非鱼养殖产业的快速发展, 行业内同质化竞争亦日趋激烈, 罗非鱼的市场价格长期低价徘徊, 罗非鱼的养殖效益逐年下降, 从而制约了

收稿日期: 2021-11-16 修回日期: 2021-12-08

资助项目: 广州市重点研发计划农业和社会发展科技专项 (202103000067); 花都区渔业产业园科技公共品牌 and 标准制定 (21302156); 国家自然科学基金青年基金 (42106130); 广东省基础与应用基础研究基金 (2020A1515110237)

第一作者: 谢曦 (照片), 从事食品科学研究, E-mail: xixie31@hotmail.com

通信作者: 林鑫, 从事水产养殖研究, E-mail: linli@zhku.edu.cn;

李清清, 从事水产养殖研究, E-mail: liqingqing@zhku.edu.cn



罗非鱼养殖产业的健康发展,唯有通过提质增效、差异化经营来改变罗非鱼养殖业同质化低水平竞争的现状,是罗非鱼养殖业发展的必然选择。

近年来,受中山脆肉鲩[草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)]养殖模式的启发,部分尼罗罗非鱼养殖从业者大胆探索,利用普通饲料将罗非鱼养殖到一定规格后再改用添加蚕豆的饲料进行饲喂,经2~3个月的脆化养殖,有效提高了尼罗罗非鱼的肌肉脆度,其肌肉具有肉质爽脆、富有弹性、久煮不烂等优点,受到消费者的广泛欢迎^[3],加上尼罗罗非鱼本身具有抗逆性强、适养范围广、无肌间刺等易养易加工特点,使脆肉尼罗罗非鱼成为了水产养殖业和水产品加工业不可多得的特色淡水产品,脆肉尼罗罗非鱼养殖得到了较快的发展,市场前景也普遍看好^[4]。由于脆肉尼罗罗非鱼是近年才发展起来的特色淡水产品,目前,业界对脆肉尼罗罗非鱼肉质特性、营养评价等方面还未有系统深入的研究,特别是对脆肉尼罗罗非鱼与普通尼罗罗非鱼的主要物理、化学特征的差异性研究尚未有相关的报道^[5-7]。

本实验通过分析脆肉尼罗罗非鱼和普通尼罗罗非鱼在肌肉质构特性、理化成分、蛋白质、氨基酸和脂肪酸等组成等方面进行分析比较,以探索脆肉尼罗罗非与普通尼罗罗非鱼的主要物理、化学特征的差异,为脆肉尼罗罗非在养殖技术优化、脆化饲料研发、保鲜和加工技术改进等方面提供可参考的研究数据和技术资料。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用鱼与饲养管理 实验用鱼均采自广东中山某养殖场养殖的鲜活脆肉尼罗罗非鱼和普通尼罗罗非鱼。该场采用三级轮养模式,一级为鱼苗标粗培育,二级为大规格鱼种培育,当鱼种采用常规养殖模式培育至体质量约250 g时进行起捕分塘转入第三级成鱼养殖阶段。第三级养殖分为循环水池塘养殖和普通鱼塘常规养殖2种模式,常规养殖模式投喂普通罗非鱼饲料,而循环水池塘养殖模式则投喂罗非鱼脆化饲料(表1)。2种养殖模式养殖密度均为37 500尾/hm²,饲料的日投料量均按估算的存塘鱼总体质量的2%~3%分3次进行投喂,并根据水温、摄食情况进行调整。成鱼养殖期间保持池塘水深1.80~2.00 m,溶

表1 饲料配方组成及营养成分含量

Tab. 1 Ingredients and proximate composition of diets %

原料 ingredient	普通饲料 normal feed	脆化饲料 crisp feed
动物粉 animal meal	15.00	5.00
骨粉 bone meal	3.00	3.00
豆粕 soybean meal	33.00	11.00
棉粕 cottonseed meal	15.00	—
麦麸 wheat bran	21.50	9.50
蚕豆粉 faba bean meal	—	60.00
大豆油 soybean oil	6.00	6.00
维生素预混料 vitamin premix	4.00	4.00
矿物质预混料 mineral premix	1.50	1.50
其他 other	1.00	0.00
合计 total	100.00	100.00
粗蛋白质 crude protein	38.32	33.21
粗脂肪 crude lipid	8.80	7.80
灰分 ash	6.58	6.71

注:—表示未添加该成分

Notes:— means this ingredient was not added

解氧>3 mg/L、氨氮<0.15 mg/L、亚盐<0.15 mg/L。

在成鱼养殖时间约达100 d时,从该养殖场捕取经脆化养殖的脆化尼罗罗非鱼和普通养殖模式养殖的普通尼罗罗非鱼活鱼各50尾(体质量约1.0 kg/尾)分别放入2个暂养池进行驯养,驯养1周后开始采样检测。

实验试剂和仪器 石油醚、盐酸、硼酸、氢氟酸、硫酸、甲醇、正己烷、氢氧化钠、硫酸钾、硝酸银及四丁基氢氧化铵等均为分析纯。KjeltecTM2300型蛋白自动分析仪(Foss公司,丹麦)、SoxtecTM2050脂肪自动分析仪(Sigma公司,德国)、N.EVAPII2型氮吹仪(Organomation公司,美国)、TA-XT2型质构仪(Stable Micro Systems公司,英国)、高效液相色谱(安捷伦科技公司,美国)、Agilent 7890气相色谱仪(安捷伦科技公司,美国)。

样品前处理 把脆肉尼罗罗非鱼和普通尼罗罗非鱼置于0℃冰水中,冻晕之后去头去内脏,用水清洗干净。分别将背部肌肉切成3 cm×3 cm×5 cm的长方体,一部分塑料袋封装用于质构测定、理化及营养分析,一部分随机分成3份放入塑料袋中,并一同置于沸水中煮10 min,用于质构测定和感官评价。

1.2 实验方法

质构测定方法 将脆肉和普通尼罗罗非鱼

肌肉分别切成 2.0 cm×2.0 cm×1.5 cm 的规格。质构测定采用质地剖面检验法 (texture profile analysis, TPA)^[7] 进行。实验采用 TA-XT2 型质构仪测试速率为 30 mm/min, 压缩距离为 4 mm, 触发值 5 g、循环 2 次、间隔 5 s, 压缩比 30%, 触发类型为自动, 测试模式为 TPA。探头为 P35 的圆柱型探头, 测试前速率 (pre-test speed) 为 2 mm/s, 测试后速率 (post-test speed) 为 5 mm/s, 测试速率 (test speed) 为 2 mm/s, 测定间隔时间为 5 s, 压缩比为 30%, 启动形式 (trigger type) 为 auto-20 g; 数据获得速率 (data acquisition rate) 为 400.00 pps。每种样品共测定 10 次, 结果取平均值。

感官评价 脆肉和普通尼罗罗非鱼的感官评价分析方法按照国家标准进行^[8], 测评人员根据国标 GB/T 16291.1—2012 及 GB/T 16860—1997 进行培训, 通过与参照食物作对比下测评硬度、弹性等指标。为尽量保证感官评价的真实性, 测评人员分别于互不可见的间隔内单独进行, 每位测评人员尝试的样本顺序、次数都不一样, 且在每个样品评价之间用清水漱口, 排除上一个样品对下个样品的影响。

基本营养成分测定 水分含量采用 105 °C 常压干燥法, 根据国标 GB 5009.3—2016 的方法进行; 灰分采用马弗炉灼烧法测定, 根据国标 GB 5009.4—2016 的方法进行; 粗蛋白采用凯氏定氮法测定, 根据国标 GB 5009.5—2016 的方法进行; 粗脂肪采用索氏抽提法测定, 根据国标 GB 5009.6—2016 的方法进行。

脂肪酸组成测定 鱼肉脂肪酸组成采用气相色谱法检测^[9]。将 2 mL 含有 1% 硫酸的甲醇加入 0.2 g 鱼肉, 并在 80 °C 加热甲基化 1 h。甲基化处理后加入 1 mL 0.9% 氯化钠和 2 mL 正己烷, 振荡, 离心分层后取上层液, 氮吹仪吹干正己烷, 用 0.5 mL 正己烷溶解制备样品。气相色谱条件: 色谱柱为 DB-23 (30 mm×0.25 mm, 0.25 μm); 进样口温度 230 °C; 升温程序: 110 °C 保持 4 min, 以 10 °C/min 升温至 160 °C 保持 1 min, 最后以 5 °C/min 上升至 240 °C 保持 15 min; 载气为氮气, 流量为 1.52 mL/min, 分流比 5:1。

游离氨基酸的测定 肌肉样品中 16 种游离氨基酸测定根据国标 GB 5009.124—2016 中的方法进行, 称取样品 3.0 g, 加入质量分数为 15% 的三氯乙酸溶液 20 mL, 匀浆 2 min 后, 静置 2 h, 4 °C 条件下, 10000 r/min 离心 15 min 后过滤, 取上清液 2 mL, 用浓度为 3 mol/L 的氢氧化钠溶液

调节 pH 至 2.0, 定容至 4 mL, 摇匀后过 0.22 μm 膜, 滤液上机检测。采用氨基酸自动分析仪测定氨基酸含量。氨基酸自动分析仪检测条件: 检测波长为 570 nm、440 nm; 色谱柱为离子交换柱; 柱温设置 60 °C; 进样体积 10 μL, 柱后反应温度为 135 °C。

1.3 数据分析

用 SPSS 19.0 和 Excel 对数据进行统计分析和处理, 数据结果用平均值±标准差 (mean±SD) 表示, $P>0.05$ 表示差异不显著, $P<0.05$ 为差异显著。

2 结果

2.1 2 种尼罗罗非鱼肌肉质构特性比较

脆肉尼罗罗非鱼与普通尼罗罗非鱼相比其生鲜肉在硬度、胶黏性和咀嚼性上有显著性差异 ($P<0.05$), 其中, 硬度、胶黏性和咀嚼性分别是普通尼罗罗非鱼的 2.0、2.5 和 2.6 倍, 但黏附性、弹性和内聚性无显著差异。而经过蒸煮处理 10 min 后, 脆肉尼罗罗非鱼与普通尼罗罗非鱼其熟肉除了在硬度、胶黏性、咀嚼性方面具有显著性差异之外 (分别是普通尼罗罗非的 3.1、4.9 和 7.8 倍), 其弹性也与普通尼罗罗非鱼有显著差异 ($P<0.05$) (表 2)。由此可见, 脆肉尼罗罗非鱼经过加热烹调后其肌肉弹性会显著提高。

2.2 2 种尼罗罗非鱼肌肉感官评价

脆肉尼罗罗非鱼和普通尼罗罗非鱼肌肉的感官评价结果显示, 脆肉尼罗罗非鱼的肌肉其硬度、黏聚性、弹性、咀嚼性和胶黏性显著高于普通尼罗罗非鱼肌肉 (表 3)。其中, 脆肉尼罗罗非鱼的弹性和胶黏性指标最为明显, 分别是普通尼罗罗非鱼的 2.0 和 1.9 倍。除此之外, 脆肉尼罗罗非鱼肉的多脂性比较明显。结合 TPA 的结果综合分析, 脆肉尼罗罗非鱼与普通尼罗罗非鱼肌肉的质构存在显著性差异。

2.3 基本营养成分分析

蛋白质、灰分、脂肪和水分含量是鱼肉中 4 个主要的成分, 但脆肉尼罗罗非鱼与普通尼罗罗非鱼肌肉中的粗蛋白和灰分含量无显著性差异 ($P>0.05$), 而脆肉尼罗罗非鱼肌肉的含水量和粗脂肪含量有显著差异 (表 4)。其中, 脆肉尼罗罗非鱼肌肉中的含水量从原来的 78.32% 下降到 76.22%, 下降约 2.10%。脂肪含量从原来的 1.00% 上升到 2.47%, 提高了 1.47 倍。

表 2 普通尼罗罗非鱼和脆肉尼罗罗非鱼肌肉 TPA 测定结果 (n=15)

Tab. 2 Texture profile analysis of muscle from normal and crisp *O. niloticus* (n=15)

	普通尼罗罗非鱼 (生肉) normal <i>O. niloticus</i> (raw fillet)	脆肉尼罗罗非鱼 (生肉) crisp <i>O. niloticus</i> (raw fillet)	普通尼罗罗非鱼 (熟肉) normal <i>O. niloticus</i> (cooked fillet)	脆肉尼罗罗非鱼 (熟肉) crisp <i>O. niloticus</i> (cooked fillet)
硬度 hardness	595.04±53.99 ^b	1 112.42±77.66 ^a	173.01±17.59 ^c	549.89±26.33 ^b
黏附性 adhesiveness	0.18±0.0 ^b	0.12±0.01 ^b	0.34±0.04 ^a	0.36±0.06 ^a
弹性 springiness	0.28±0.01 ^c	0.29±0.02 ^c	0.39±0.02 ^b	0.60±0.03 ^a
胶黏性/g gumminess	258.35±26.73 ^c	658.83±63.81 ^a	79.52±10.12 ^d	388.50±71.99 ^b
咀嚼性/g chewiness	244.09±47.32 ^b	698.33±66.70 ^a	116.14±37.61 ^c	247.12±55.37 ^b
内聚性 cohesiveness	0.42±0.018 ^b	0.60±0.01 ^a	0.46±0.03 ^b	0.72±0.03 ^a

注：同一指标标注不同小写字母表示差异显著；实验结果的统计分析采用单因素方差分析 (P < 0.05)；下同
Notes: The different letters in the same index means significant difference; the statistical analysis of the results from the experiments was conducted using One-Way analysis of variance (P < 0.05); the same below

表 3 普通尼罗罗非鱼和脆肉尼罗罗非鱼肌肉感官评价结果 (n=15)

Tab. 3 Evaluation of the sensory characteristics of muscle from normal and crisp *O. niloticus* (n=15)

	普通尼罗罗非鱼 normal <i>O. niloticus</i>	脆肉尼罗罗非鱼 crisp <i>O. niloticus</i>
硬度 hardness	3.19±0.53 ^b	4.50±0.53 ^a
黏聚性 adhesiveness	2.63±0.25 ^b	4.00±0.35 ^a
弹性 springiness	2.81±0.29 ^b	5.69±0.91 ^a
咀嚼性 chewiness	8.25±1.65 ^b	10.63±1.49 ^a
胶黏性 gumminess	3.38±0.35 ^b	6.75±0.29 ^a
多脂性 greasiness	2.38±0.39 ^b	3.25±0.52 ^a

表 4 普通尼罗罗非鱼和脆肉尼罗罗非鱼肌肉基本营养成分含量 (n=15)

Tab. 4 Composition of nutritional components from normal and crisp *O. niloticus* (n=15) %

	普通尼罗罗非鱼 normal <i>O. niloticus</i>	脆肉尼罗罗非鱼 crisp <i>O. niloticus</i>
总脂肪 total fat	1.00±0.12 ^b	2.47±0.64 ^a
总蛋白 total protein	16.93±0.27	17.27±0.14
总灰分 ash content	1.18±0.08	1.24±0.03
含水量 moisture content	78.32±1.28 ^a	76.22±1.09 ^b

2.4 2 种尼罗罗非鱼的脂肪酸组成比较

对 2 种鱼肌肉的脂肪酸组成分析结果显示，脆肉尼罗罗非鱼总脂肪酸含量显著高于普通尼罗罗非鱼，且脆肉尼罗罗非鱼饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸含量都显著高于普通尼罗罗非鱼，分别是普通尼罗罗非鱼的 1.67 和 2.31 倍 (图 1)。尼罗罗非鱼鱼肉脂肪酸中不饱和脂肪酸较多，脆肉尼罗罗非鱼各种脂肪酸含量普遍高于普通尼罗罗非鱼。就饱和脂肪酸而言，脆肉尼罗罗非鱼的棕榈酸 (C16:0) 显著高于普通尼罗罗非鱼。不饱和脂肪酸含量显示，脆肉尼罗罗非鱼显著高于普通尼罗罗

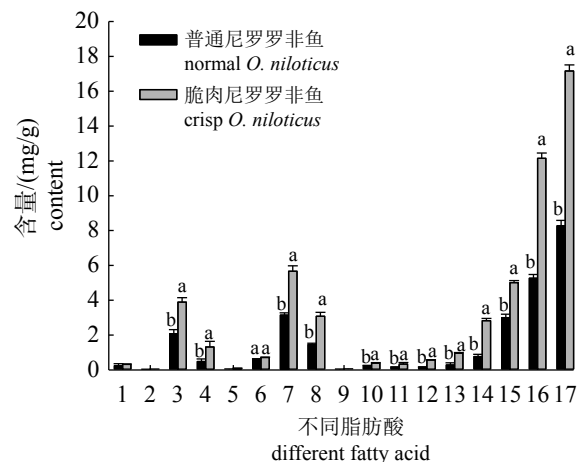


图 1 普通尼罗罗非鱼和脆肉尼罗罗非鱼的脂肪酸组成
1. 14:0, 2. 15:0, 3. 16:0, 4. 16:1, 5. 17:1, 6. 18:0, 7. 18:1, 8. 18:2, 9. 20:0, 10. 20:1, 11. 20:3, 12. 20:4, 13. 20:5, 14. 22:6, 15. 饱和脂肪酸, 16. 不饱和脂肪酸, 17. 总脂肪酸; 同一组标注不同小写字母表示差异显著 (P < 0.05); 实验结果的统计分析采用单因素方差分析

Fig. 1 Fatty acids composition of normal and crisp *O. niloticus*

1. 14:0, 2. 15:0, 3. 16:0, 4. 16:1, 5. 17:1, 6. 18:0, 7. 18:1, 8. 18:2, 9. 20:0, 10. 20:1, 11. 20:3, 12. 20:4, 13. 20:5, 14. 22:6, 15. saturated fatty acids, 16. unsaturated fatty acids, 17. total fatty acids; different letters indicate significantly different in the same group (P < 0.05); the statistical analysis of the results from the experiments was conducted using One-Way analysis of variance

非鱼，其中棕榈油酸 (C16:1)、油酸 (C18:1)、亚油酸 (C18:2)、二十碳五烯酸 (EPA, C20:5) 和二十二碳六烯酸 (DHA, C22:6) 含量分别是普通尼罗罗非鱼的 2.73、1.80、2.12、3.36 和 3.71 倍。

2.5 2 种尼罗罗非鱼肌肉中氨基酸含量

脆肉尼罗罗非鱼中总游离氨基酸含量低于普通尼罗罗非鱼 (表 5)。鲜味氨基酸含量显示，脆肉尼罗罗非鱼中鲜味氨基酸含量显著低于普通尼罗

罗非鱼(约 40.00%)($P < 0.05$), 主要是由于肌肉中的游离甘氨酸含量显著下降造成, 其含量只有普通尼罗罗非鱼含量的 58.57%。其余鲜味氨基酸(包括天冬氨酸、谷氨酸和丙氨酸)含量与普通尼罗罗非鱼相比无显著差异。脆肉尼罗罗非鱼的必需氨基酸总含量显著高于普通尼罗罗非鱼, 其中除了苏氨酸和组氨酸之外, 缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸和赖氨酸的含量均显著高于普通尼罗罗非鱼($P < 0.05$)。

表 5 普通尼罗罗非鱼与脆肉尼罗罗非鱼肌肉中游离氨基酸含量的比较

		普通尼罗罗非鱼 normal <i>O. niloticus</i>	脆肉尼罗罗非鱼 crisp <i>O. niloticus</i>
鲜味氨基酸 umami amino acids	天冬氨酸 Asp	2.08±0.03 ^b	2.38±0.10 ^a
	谷氨酸 Glu	5.02±0.35	5.50±0.33
	甘氨酸 Gly	114.33±6.58 ^a	66.97±10.57 ^b
	丙氨酸 Ala	20.40±0.92 ^b	25.87±0.53 ^a
	鲜味氨基酸总量	141.84±1.97 ^a	100.71±2.89 ^b
必需氨基酸 essential amino acids	缬氨酸 Val	4.00±0.07 ^b	4.48±0.11 ^a
	苏氨酸 Thr	6.21±0.11 ^a	5.69±0.21 ^b
	蛋氨酸 Met	<2.0	<2.0
	异亮氨酸 Ile	3.85±0.06 ^b	4.31±0.11 ^a
	亮氨酸 Leu	4.57±0.09 ^b	5.41±0.16 ^a
	苯丙氨酸 Phe	3.67±0.06 ^b	3.87±0.08 ^a
	赖氨酸 Lys	18.03±1.03 ^b	21.10±1.36 ^a
	组氨酸 His	9.79±0.37 ^a	6.71±0.74 ^b
必需氨基酸总量	50.12±0.45 ^b	51.58±0.69 ^a	
游离氨基酸 free amino acid	精氨酸 Arg	4.78±0.28 ^b	5.67±0.36 ^a
	酪氨酸 Tyr	3.34±0.09	3.31±0.11
	脯氨酸 Pro	4.20±0.10 ^b	4.76±0.24 ^a
	丝氨酸 Ser	4.62±0.06 ^b	4.98±0.07 ^a
	总游离氨基酸	208.00±5.81 ^a	171.00±8.56 ^b
	必需氨基酸比例/%	19.37	26.24
	鲜味氨基酸比例/%	68.19	58.89
	半必需氨基酸比例/%	7.00	7.24

3 讨论

尼罗罗非鱼作为一种营养丰富且无肉间刺的淡水鱼品种^[10-11], 具有生长快、病害少、适应性广和产量高等特点^[10-12]。但普通养殖模式下尼罗罗非鱼其肉质偏软、口感欠佳, 市场价值偏低^[13-14],

采取提升尼罗罗非鱼鱼肉脆度的措施, 能有效解决其口感偏软的问题^[15-16]。但尼罗罗非鱼在脆化养殖过程中必会发生一系列的生理生化反应, 其肌肉质构特征、营养成分、食用品质、肌肉氨基酸和脂肪酸组成如何变化, 以及变化程度等需要通过实验进行测定量化^[17-19], 获取必要的基础实验数据, 为后续的脆肉尼罗罗非鱼的养殖、专用脆化饲料配制、产品保鲜和加工等技术的改进提供参考。

本实验结果表明, 与普通尼罗罗非鱼相比, 脆肉尼罗罗非鱼在生鲜肉和熟肉的质构特性方面表现出明显的差异。其中生鲜肉在硬度、胶黏性和咀嚼性 3 个指标上与普通尼罗罗非鱼有显著的区别, 而经过蒸煮后, 脆肉尼罗罗非鱼除了上面 3 个指标与普通尼罗罗非鱼有显著差异外, 肌肉的弹性亦显著增加, 可以证明, 采用质构剖面法能显著性区分脆肉尼罗罗非鱼和普通尼罗罗非鱼的肌肉^[20-21], 该方法可以作为测定脆肉尼罗罗非鱼肌肉脆度的一个可行的方法。对 2 种尼罗罗非鱼肌肉的基本营养成分分析表明, 脆肉尼罗罗非鱼的总蛋白、灰分与普通尼罗罗非鱼没有显著差异, 而含水量显著低于普通尼罗罗非鱼, 含脂量高于普通尼罗罗非鱼^[22]。鱼肉含水量, 尤其是结合水的比例与其紧实度呈正相关。结合水能与蛋白质或其他碳水化合物上的功能基团以氢键结合, 形成肌肉的主体结构, 从而影响鱼肉的质构。水分含量与鱼肉的机械强度呈负相关。本实验结果显示, 脆肉尼罗罗非鱼肌肉含水量较普通尼罗罗非鱼非低, 与其脆性明显提升有一定的关系^[23]。除此以外, 实验对 2 种尼罗罗非鱼肌肉的脂肪酸含量和脂肪酸组分分析表明, 脆肉尼罗罗非鱼脂肪酸含量明显高于普通尼罗罗非鱼, 尤其是饱和脂肪酸中棕榈酸和功能性多不饱和脂肪酸 EPA 和 DHA 等^[24-26]。棕榈酸作为人体重要的营养物质, 占人体总脂肪酸的 26% 以上, 是机体能量来源之一, 也是人体合成其他长链脂肪酸的前体物质。而 EPA 和 DHA 这类多不饱和脂肪酸是人体重要的功能性油脂, 他们在维护生物膜结构和功能、提高机体免疫能力、促进生长发育、调节脂类代谢以及相关基因表达等方面发挥重要的作用。脆肉尼罗罗非鱼肌肉的棕榈酸含量是普通尼罗罗非鱼的 2.0 倍, EPA、DHA 分别是普通尼罗罗非鱼的 3.3 和 3.7 倍, 表明脆肉尼罗罗非鱼的脂肪营养价值优于普通尼罗罗非鱼^[5,24,26]。

游离氨基酸是指肌肉中存在的非结合态氨基酸的总称,不需要酶分解就能直接被机体吸收的一类营养物质。测定尼罗罗非鱼肌肉中的游离氨基酸既能了解鱼肉的营养水平、风味特征,又能跟踪尼罗罗非鱼脆化过程中的生理生化变化。对2种尼罗罗非鱼肌肉游离氨基酸含量比较结果发现,脆肉尼罗罗非鱼肌肉中必需氨基酸含量除了苏氨酸和组氨酸略低于普通尼罗罗非鱼,其余氨基酸都比普通尼罗罗非鱼含量高,尤其是赖氨酸和异亮氨酸含量较普通尼罗罗非鱼分别高14.76%和11.91%。必需氨基酸是人体自身不能合成的,必须从食物中摄取,因此,从必需氨基酸含量的高低即可判断食物的营养价值^[27]。赖氨酸作为碱性必需氨基酸,在日常谷物膳食中含量较低,故而被划分为限制性氨基酸,人类需要通过摄入赖氨酸来调节机体代谢平衡,提高钙的吸收、提高胃肠消化效率、增进食欲、促进生长与发育^[28]。此外,异亮氨酸能缓和神经衰退、增加食欲和提高免疫力,摄入足量的异亮氨酸还能调节肌肉蛋白的合成速率,加速肌肉恢复^[29]。因此,脆肉尼罗罗非鱼肉的这两类氨基酸含量上升提高了鱼肉的营养价值。游离氨基酸也是食品中一类重要的呈味成分,能呈现出酸、甜、苦以及鲜等独特的滋味,其组成、含量会直接影响鱼肉的鲜美程度^[30]。而鱼肉的鲜美程度与鲜味氨基酸(天冬氨酸、甘氨酸、谷氨酸和丙氨酸)的含量有关,其中,谷氨酸为重要的鲜味氨基酸,且与肌苷酸有着显著的协同增强作用,对鱼肉的鲜味有比较重要的价值^[31]。对2种尼罗罗非鱼的鲜味氨基酸比较分析指出,脆肉尼罗罗非鱼的甘氨酸含量明显低于普通尼罗罗非鱼,而包括谷氨酸在内的氨基酸含量皆与普通尼罗罗非鱼含相近或略高,说明尼罗罗非鱼脆化后可能由于甘氨酸的降低而影响其鲜味,但综合风味和营养价值没有显著差别。

有研究指出,蚕豆诱导的草鱼肌肉脆化是由鱼肉中的胶原蛋白含量增加引起的^[3]。胶原蛋白主要是由甘氨酸、脯氨酸、羟脯氨酸和精氨酸构成的。对胶原蛋白结构分析表明,其蛋白序列主要以甘氨酸-脯氨酸-X或甘氨酸-X-羟脯氨酸这2种单元组成,因此甘氨酸是胶原蛋白合成最重要的氨基酸^[32]。更有研究表明,关节软骨细胞生成的过程中会大量消耗体液中游离甘氨酸,用于软骨细胞中胶原蛋白的合成^[33]。本实验发现,在总蛋白含量无明显变化的情况下,脆化后的尼罗罗

非鱼游离氨基酸含量明显低于普通尼罗罗非鱼,主要是由于甘氨酸的含量降低所致^[34]。该变化可能是由于肌肉中大部分的游离甘氨酸在尼罗罗非鱼脆化过程中被用于肌肉中胶原蛋白的合成引起的,与尼罗罗非鱼的脆化过程中生理变化有重要关系,该推测需要进行深入研究来证实。

脆肉尼罗罗非鱼肌肉的质构和营养组成变化与其饲料的变化存在非常紧密的关系。罗非鱼的脆化饲料与普通饲料相比,蛋白质、脂肪含量等无显著差异,但脆化饲料中蚕豆的添加量达到60%,其中包含的一些抗营养因子会导致机体发生功能性障碍^[35],因此,生物体会通过改变相应器官的代谢、加强个别功能等来进行补偿。而脆肉尼罗罗非鱼脂肪酸含量明显增加,可能是由这类代偿反应导致的。同时,这些因子会诱导尼罗罗非鱼体内进行一系列的生理变化,导致鱼肉的肌纤维结构蛋白发生变化、肌纤维变粗、胶原蛋白增加,从而提高肌肉弹性^[36]。但目前的复配蚕豆脆化饲料,在真正应用到脆肉尼罗罗非鱼的大规模养殖中存在着一系列的问题。首先,蚕豆中抗营养因子会因为季节、种植管理和产地等因素导致含量变化大,不同批次蚕豆的抗营养因子的含量不同,进而影响尼罗罗非鱼的脆化效果^[37]。其次,现有的脆化饲料因为需要添加大量的蚕豆,必然导致其他营养物质含量降低。目前相关的研究文献资料揭示,蚕豆蛋白的氨基酸含量不均衡,其蛋氨酸、半胱氨酸和色氨酸含量较低^[38]。缺乏上述氨基酸会抑制尼罗罗非鱼的正常生理活动,对尼罗罗非鱼的正常生长和抗病能力有较大影响。因此,目前市场上脆肉尼罗罗非鱼的质量良莠不齐,产量有较大的局限性,难以形成产业化的批量生产,需要对脆肉尼罗罗非鱼饲料进行必要的优化,从而促进脆肉尼罗罗非鱼养殖实现高效、优质、产业化批量生产。

脆肉尼罗罗非鱼的化学组成变化使其在加工、贮藏技术方面存在特殊性。因此,应在其加工的过程中缩短鱼肉的热处理时间、更好地保持鱼肉的弹性。由于脆肉尼罗罗非鱼肌肉的胶原蛋白含量增加,其肌肉保水性变差,容易失水,因此,在贮藏过程中应减少降温时间、减少鱼肉水分蒸发。另外,脆肉尼罗罗非鱼的脂肪酸含量较普通尼罗罗非鱼高,会使其物理性质发生变化。甘承露等^[39]在比较脆肉鲩和普通草鱼的热特性时发现,脆肉鲩的冻结温度明显高于草鱼,在较高的温度

下容易结成冰晶,可能是由于其不溶性成分(如脂肪)含量较高从而影响脆肉鲩的物理性质。本研究结果同样显示,尼罗罗非鱼脆化后其脂肪含量随之增加,同时也会影响到其肌肉的热特性,导致冻结温度提高。脆肉尼罗罗非鱼中的油脂尤其是多不饱和脂肪酸的含量是普通尼罗罗非鱼的2倍以上,这类脂肪酸的鱼肉在贮藏过程中容易发生氧化和产生异味,从而影响鱼肉质量。而在油炸等高温烹调过程中,富含不饱和脂肪酸的食材容易产生大量的醛类物质,醛类物质有潜在的毒性,可导致心脏病、癌症、痴呆等相关疾病,影响消费者健康^[40]。因此,在脆肉尼罗罗非鱼的加工、贮藏过程中要根据脆肉尼罗罗非鱼鱼肉组成的化学变化改进加工方式,调整贮藏温度,确保脆肉尼罗罗非鱼的贮藏、加工皆应控制在最佳条件下进行,从而延长脆肉尼罗罗非鱼加工产品的储存时间并保证其质量。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献 (References):

- [1] Deane E E, Woo N Y S. Modulation of fish growth hormone levels by salinity, temperature, pollutants and aquaculture related stress: a review[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2009, 19(1): 97-120.
- [2] 王煜坤, 郝淑贤, 李来好, 等. 不同地区、品种及养殖模式罗非鱼营养差异分析[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(12): 231-237.
- Wang Y K, Hao S X, Li L H, *et al.* Analysis on nutrition difference of tilapia in different regions, species and breeding pattern[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(12): 231-237 (in Chinese).
- [3] Yu E M, Xie J, Wang G J, *et al.* Gene expression profiling of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) and crisp grass carp[J]. *International Journal of Genomics*, 2014, 2014: 639687.
- [4] 廖静, 罗勇. 中山绿笙源: 脆肉罗非成为新晋“网红”[J]. *海洋与渔业*, 2019, 27(11): 39-40.
- Liao J, Luo Y. Crispness tilapia became the new net celebrity[J]. *Marine and Fisheries*, 2019, 27(11): 39-40 (in Chinese).
- [5] 伍芳芳, 林婉玲, 李来好, 等. 草鱼脆化过程中肌肉胶原蛋白、矿物质含量和脂肪酸组成变化[J]. *食品科学*, 2015, 36(10): 86-89.
- Wu F F, Lin W L, Li L H, *et al.* Changes in muscle collagen content, mineral contents and fatty acid composition of grass carp during crisping process[J]. *Food Science*, 2015, 36(10): 86-89 (in Chinese).
- [6] Chen L J, Liu J, Kaneko G, *et al.* Quantitative phosphoproteomic analysis of soft and firm grass carp muscle[J]. *Food Chemistry*, 2020, 303: 125367.
- [7] 林婉玲, 王瑞旋, 王锦旭, 等. 脆肉鲩不同部位肌肉的质构特征分析[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(3): 211-218.
- Lin W L, Wang R X, Wang J X, *et al.* Texture analysis of different parts of muscles in crisp grass carp (*Ctenopharyngodon idellus* C. et V)[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2020, 36(3): 211-218 (in Chinese).
- [8] 林婉玲, 杨贤庆, 李来好, 等. 脆肉鲩质构与感官评价的相关性研究[J]. *现代食品科技*, 2013, 29(1): 1-7,72.
- Lin W L, Yang X Q, Li L H, *et al.* Research of relationship between texture and sensory evaluation of crisp grass carp[J]. *Modern Food Science and Technology*, 2013, 29(1): 1-7,72 (in Chinese).
- [9] Ackman R G. Characteristics of the fatty acid composition and biochemistry of some fresh-water fish oils and lipids in comparison with marine oils and lipids[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 1967, 22(3): 907-922.
- [10] Gobi N, Ramya C, Vaseeharan B, *et al.* *Oreochromis mossambicus* diet supplementation with *Psidium guajava* leaf extracts enhance growth, immune, antioxidant response and resistance to *Aeromonas hydrophila*[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2016, 58: 572-583.
- [11] Davis D, Nguyen T, Li M, *et al.* Advances in aquaculture nutrition: catfish, tilapia and carp nutrition[M]//Burnell G, Allan G. *New Technologies in Aquaculture*. Amsterdam: Elsevier, 2009: 440-458.
- [12] Russell D J, Thuesen P A, Thomson F E. A review of the biology, ecology, distribution and control of Mozambique tilapia, *Oreochromis mossambicus* (Peters 1852) (Pisces: Cichlidae) with particular emphasis on invasive Australian populations[J]. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 2012, 22(3): 533-554.
- [13] Luo G Z, Gao Q, Wang C H, *et al.* Growth, digestive activity, welfare, and partial cost-effectiveness of genetically improved farmed tilapia (*Oreochromis niloticus*) cultured in a recirculating aquaculture system and an indoor biofloc system[J]. *Aquaculture*, 2014, 422-423: 1-

- 7.
- [14] Wang M, Lu M X. Tilapia polyculture: a global review[J]. *Aquaculture Research*, 2016, 47(8): 2363-2374.
- [15] Liu B L, Liu Y, Sun G X. Effects of stocking density on growth performance and welfare-related physiological parameters of Atlantic salmon *Salmo salar* L. in recirculating aquaculture system[J]. *Aquaculture Research*, 2017, 48(5): 2133-2144.
- [16] Sow L C, Toh N Z Y, Wong C W, et al. Combination of sodium alginate with tilapia fish gelatin for improved texture properties and nanostructure modification[J]. *Food Hydrocolloids*, 2019, 94: 459-467.
- [17] Xu W H, Guo H H, Chen S J, et al. Transcriptome analysis revealed changes of multiple genes involved in muscle hardness in grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fed with faba bean meal[J]. *Food Chemistry*, 2020, 314: 126205.
- [18] Zhu Z W, Ruan Z, Li B S, et al. Quality loss assessment of crisp grass carp (*Ctenopharyngodon idellus* C. et V) fillets during ice storage[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2013, 37(3): 254-261.
- [19] 侯燕芳, 赵利, 陈丽丽, 等. 脆肉鲩与草鱼肌肉营养成分及肉质特性的比较[J]. *科学养鱼*, 2016(12): 76-78.
- Hou Y F, Zhao L, Chen L L, et al. Comparison of nutrient composition and meat quality characteristics of crispy carp and grass carp[J]. *Scientific Fish Farming*, 2016(12): 76-78 (in Chinese).
- [20] Dinçer T, Yılmaz E B Ş, Çaklı Ş, et al. Determination of quality changes of fish sausage produced from saithe (*Pollachius virens* L., 1758) during cold storage[J]. *Su Ürünleri Dergisi*, 2017, 34(4): 391-399.
- [21] Dincer T, Cakli S. Textural and sensory properties of fish sausage from rainbow trout[J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2010, 19(3-4): 238-248.
- [22] Cheng J H, Sun D W, Han Z, et al. Texture and structure measurements and analyses for evaluation of fish and fillet freshness quality: a review[J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2014, 13(1): 52-61.
- [23] Hyldig G, Nielsen D. A review of sensory and instrumental methods used to evaluate the texture of fish muscle[J]. *Journal of Texture Studies*, 2001, 32(3): 219-242.
- [24] 甘承露, 郭姗姗, 荣建华, 等. 脆肉鲩肌肉主要营养成分的分析[J]. *营养学报*, 2010, 32(5): 513-515.
- Gan C L, Guo S S, Rong J H, et al. Analysis of the main nutritional components of crisp grass carp[J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 2010, 32(5): 513-515 (in Chinese).
- [25] Rawendra R D S, Lo D, Dikwatama A V. Comparative study of fatty acid composition and sensory acceptance of Indonesian shortfin eel (*Anguilla bicolor*) and farmed Atlantic salmon (*salmo salar*) [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 794(1): 012143.
- [26] 刘宏超, 李瑞伟, 纪丽丽, 等. 罗非鱼的脂肪酸组成分析[J]. *福建水产*, 2008(3): 54-56.
- Liu H C, Li R W, Ji L L, et al. Fatty acids composition analysis of Tilapias[J]. *Journal of Fujian Fisheries*, 2008(3): 54-56 (in Chinese).
- [27] 郝淑贤, 李来好, 杨贤庆, 等. 5种罗非鱼营养成分分析及评价[J]. *营养学报*, 2007, 29(6): 614-615, 618.
- Hao S X, Li L H, Yang X Q, et al. Analysis and evaluation of nutrient composition of Tilapias[J]. *Acta Nutrimenta Sinica*, 2007, 29(6): 614-615, 618 (in Chinese).
- [28] Wang Y, Chen S S. Comparative composition of free amino acids in wild and cultured *Procambarus clarkii* [J]. *Food Science*, 2014, 35(11): 269-273.
- [29] Tomé D, Bos C. Lysine requirement through the human life cycle[J]. *The Journal of Nutrition*, 2007, 137(6): 1642S-1645S.
- [30] Karlsson H K R, Nilsson P A, Nilsson J, et al. Branched-chain amino acids increase p70^{S6k} phosphorylation in human skeletal muscle after resistance exercise[J]. *American Journal of Physiology-Endocrinology and Metabolism*, 2004, 287(1): E1-E7.
- [31] 陈清华, 肖调义, 吴松山, 等. 脆肉鲩肌肉游离氨基酸初步分析[J]. *水利渔业*, 2004, 24(6): 8-10.
- Chen Q H, Xiao T Y, Wu S S, et al. Analysis of dissociative amino acids in the muscle of *Ctenopharyngodon idellus* [J]. *Reservoir Fisheries*, 2004, 24(6): 8-10 (in Chinese).
- [32] 施文正, 陈青云, 王金庆, 等. 冷冻对不同部位草鱼肉鲜度和滋味的影响[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(16): 334-336, 341.
- Shi W Z, Chen Q Y, Wan J Q, et al. Effect of frozen on freshness and taste of grass carp meat[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2014, 35(16): 334-

- 336,341 (in Chinese).
- [33] Silver F H, Jaffe M. Structure and behavior of collagen fibers[M]//Bunsell A R. Handbook of tensile properties of textile and technical fibres. Amsterdam: Elsevier, 2009: 179-193.
- [34] De Paz-Lugo P, Lupiáñez J A, Meléndez-Hevia E. High glycine concentration increases collagen synthesis by articular chondrocytes *in vitro*: acute glycine deficiency could be an important cause of osteoarthritis[J]. *Amino Acids*, 2018, 50(10): 1357-1365.
- [35] Labba I C M, Frøkiær H, Sandberg A S. Nutritional and antinutritional composition of fava bean (*Vicia faba* L., *var. minor*) cultivars[J]. *Food Research International*, 2021, 140: 110038.
- [36] Yu E M, Fu B, Wang G J, *et al.* 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.
- [37] 郑小淼, 李小勤, 魏静, 等. 蚕豆及其提取物对草鱼生长、肌肉成分和血清生化指标的影响[J]. *水生生物学报*, 2016, 40(1): 173-180.
- Zheng X M, Li X Q, Wei J, *et al.* Effects of broad bean and its extract on growth, muscle composition and serum biochemical indices of grass carp[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2016, 40(1): 173-180 (in Chinese).
- [38] Liu Y J, Wu X X, Hou W W, *et al.* Structure and function of seed storage proteins in faba bean (*Vicia faba* L.) [J]. *3 Biotech*, 2017, 7(1): 74.
- [39] 甘承露, 郭姗姗, 荣建华, 等. 脆肉鲩低温相变区热特性的研究[J]. *食品科学*, 2009, 30(23): 224-228.
- Gan C L, Guo S S, Rong J H, *et al.* Thermo-physical properties of crisped grass carp meat during low temperature phase transition[J]. *Food Science*, 2009, 30(23): 224-228 (in Chinese).
- [40] Larsson K, Harrysson H, Havenaar R, *et al.* Formation of malondialdehyde (MDA), 4-hydroxy-2-hexenal (HHE) and 4-hydroxy-2-nonenal (HNE) in fish and fish oil during dynamic gastrointestinal *in vitro* digestion[J]. *Food & Function*, 2016, 7(2): 1176-1187.

Comparative analysis of physicochemical and nutritional properties between crisp and normal *Oreochromis niloticus*

XIE Xi¹, ZHAI Xiaoqian², LI Feng², DENG Jianchao³, YANG Xianqing³, LIANG Shaowen⁴,
KOU Hongyan², HUANG Yao², LIU Huaqing⁵, LI Wenwei⁵, LI Qingqing^{2*}, LIN Li^{2,6*}

(1. College of Light Industry and Food, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China;

2. Guangdong Provincial Water Environment and Aquatic Products Security Engineering Technology Research Center, Guangzhou Key Laboratory of Aquatic Animal Diseases and Waterfowl Breeding, College of Animal Science Technology, Zhongkai University of Agriculture and Engineering, Guangzhou 510225, China;

3. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;

4. Guangdong Youpei Supply Chain Management Co., Ltd. Zhongshan 528400, China;

5. Agriculture and Rural Department of Huadu District in Guangzhou, Guangzhou 510800, China;

6. Zhonghua Modern Agricultural Research Institute of Huadu District in Guangzhou, Guangzhou 510800, China)

Abstract: Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) is a main aquaculture fish product in China, which is famous for its delicious taste, no intermuscular bone and high nutrition. Currently, it has been observed that the muscle elasticity of *O. niloticus* can be effectively improved by feeding with Faba bean meal. This kind of *O. niloticus* was named crisp *O. niloticus* which has become an economically important freshwater fish species with high economic value. However, little is known about the muscular features between crisp and normal *O. niloticus*. To investigate the differences of texture properties and nutritional components between crisp and normal *O. niloticus*, the texture properties, basic chemical composition, free amino acid composition, fatty acids composition and sensory evaluation were measured in this study. Both texture profile analysis and sensory evaluation results indicated that the hardness, springiness and chewiness between crisp and normal *O. niloticus* muscles were significantly different ($P < 0.05$). For the basic chemical composition, the contents of crude protein and ash content of two kinds of *O. niloticus* were similar, while the water content of crisp one was lower whereas crude fat was higher than the normal one ($P < 0.05$). Fatty acids composition analysis revealed that the polyunsaturated fatty acids level of crisp *O. niloticus* was significantly higher than the normal *O. niloticus* with great nutritional value ($P < 0.05$). Especially, the content of linoleic acids, eicosapentaenoic acids and docosahexaenoic acids of crisp *O. niloticus* were 2.12, 3.36 and 3.71 times higher than the normal ones, respectively. For free amino acids, the essential amino acids and umami amino acids of crisp *O. niloticus* were significantly higher than normal one excepting lysine ($P < 0.05$). This study showed that the physical texture, water content, fatty acid content and free amino acid composition of crisp *O. niloticus* were significantly different when compared with the normal one.

Key words: crisp *Oreochromis niloticus*; mastication; texture; sensory evaluation; nutrition

Corresponding authors: LIN Li. E-mail: linli@zhku.edu.cn;

LI Qingqing. E-mail: liqingqing@zhku.edu.cn

Funding projects: Key Research and Development Program of Guangzhou City (202103000067); Public Science Brand and Standards Establishment for Huadu Fishery Industrial Park (21302156); National Natural Science Foundation of China (42106130); Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation (2020A1515110237)