调理鱼制品“蒜瓣肉”的结构表征与评价

李想，蔡礼彬，熊善柏*，胡杨*

（华中农业大学食品科学技术学院，湖北武汉 430070）

摘要：以草鱼为研究对象，通过控制食盐添加量、调理温度和调理时间制备出 12 组不同调理程度的鱼片，综合运用感官评价、质构分析及组织结构特征分析，描述调理鱼片“蒜瓣肉”结构特征，建立调理鱼片“蒜瓣肉”结构评价标准。结果表明，制备的 12 组调理鱼片的感官评分、质构特性、组织形态存在显著差异（$P<0.05$）。通过控制调理食盐添加量、调理温度和调理时间，可制备出具有典型“蒜瓣肉”结构的调理鱼片。调理鱼片“蒜瓣肉”结构感官评分与质构参数中的硬度值和粘附性值呈显著正相关性（$P<0.05$），而与肌纤维面积呈极显著负相关性（$P<0.01$），具有优良“蒜瓣肉”结构的调理鱼片的质构和组织结构参数为：硬度 2 600~3 300 g、弹性 0.56~0.74、咀嚼性 600~1 300 g，回复性 0.24~0.32，粘附性 240~350 g·sec，肌纤维面积 24 000~32 000 μm^2，肌间距离 16~21 μm。该研究有望为调理鱼片“蒜瓣肉”结构的合理评价及可控制备提供技术参考。

关键词：调理鱼制品；“蒜瓣肉”结构；组织结构；结构表征；评价标准

文章编号：1673-9078(2023)02-1-8 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.2.0537

Characterization and Evaluation of the “Garlic Clove” Meat Structure in Processed Fish Products

LI Xiang, CAI Libin, XIONG Shanbai*, HU Yang*

(College of Food Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Twelve grass carp fish fillets, with different degrees of processing, were prepared by controlling the amount of salt added, processing temperature, and processing time. Through comprehensive use of sensory evaluation, texture analysis, and tissue structure characterization, the characteristics of the “garlic clove” meat structure in processed fish fillets were described and criteria were established for their structural evaluation. Significant differences were observed among the sensory scores, textural properties, and tissue morphologies of the 12 groups of processed fish fillets. Processed grass carp fillets with a typical” garlic clove” meat structure can be prepared by controlling the amount of added salt, processing temperature, and processing time. The sensory score of the “garlic clove” meat structure in processed fish fillets was positively correlated with the textural parameters like hardness and adhesiveness ($P<0.05$), and negatively correlated with muscle fiber area ($P<0.01$). The texture and tissue structure parameters of processed fish fillets with excellent “garlic clove” meat structure were as follows: hardness 2 600~3 300 g, elasticity 0.56~0.74, chewiness 600~1 300 g, resilience 0.24~0.32, adhesiveness 240~350 g·sec, muscle fiber area 24 000~32 000 μm^2, and intermuscular distance 16~21 μm. This data provides a technical reference for the reasonable evaluation and controllable preparation of fish fillets with “garlic clove” meat structure.

Key words: processed fish products; “garlic clove” meat structure; tissue structure; structural characterization; evaluation criteria

引文格式：

李想,蔡礼彬,熊善柏,等.调理鱼制品“蒜瓣肉”的结构表征与评价[J].现代食品科技,2023,39(2):1-8

LI Xiang, CAI Libin, XIONG Shanbai, et al. Characterization and evaluation of the “garlic clove” meat structure in processed fish products [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(2): 1-8

收稿日期：2022-04-29

基金项目：国家重点研发计划项目（2022YFD2100904）；国家自然科学基金项目（32172227）；国家现代农业产业技术体系（CARS-45-28）

作者简介：李想（1997-），女，硕士研究生，研究方向：水产品加工及贮藏，E-mail：lixiang97.3@163.com

通讯作者：熊善柏（1963-），男，教授，研究方向：水产品加工及副产物综合利用，E-mail：xiongsb@mail.hzau.edu.cn；共同通讯作者：胡杨（1987-），男，博士，副教授，研究方向：水产品加工及副产物综合利用，E-mail：huyang@mail.hzau.edu.cn

在我国新零售和新餐饮业快速发展背景下，规模化、工业化、标准化的菜肴生产方式对家庭、餐馆的全流程烹饪方式正呈现出极大的替代性，美味、营养、安全、方便的预制菜肴成为我国居民近年来的消费热点，其市场规模已突破千亿元[1]。调理水产制品（预制水产菜肴）是指以新鲜水产品为原料，经宰杀、清洗、分割、调理、包装、速冻和冻藏等工序制成的一类水产预制菜品[2]，是预制菜肴中的一大类型，因其含有丰富的蛋白质、脂肪、矿物质、维生素等营养成分，且烹饪方便深受消费者欢迎[3]。目前国内外众多企业纷纷涉足预制菜产业，已开发了调理马鲛鱼[4]、腌大黄鱼[5]、酸菜鱼[6]等多种调理水产制品。

鱼肉的组织结构、质地特征、风味品质是衡量预制调理鱼制品质量高低的重要评价指标[3]。部分鱼肉经调理、冻藏、烹饪加工后形成“蒜瓣状”组织结构并表现出良好口感，可提高消费者的可接受性[7]。近年来，亦有多名学者在研究臭鳜鱼、发酵鱼等调理鱼制品时把是否形成“蒜瓣状”作为一个重要的感官评价指标，观察调理鱼制品是否外观呈片层状、口感鲜嫩爽弹[8-10]。然而调理鱼制品中“蒜瓣肉”结构具体的结构特征尚未见报道，对于“蒜瓣肉”结构的评价方法目前尚无统一标准。因此，本研究以草鱼为对象，通过控制调理食盐添加量、调理温度和调理时间等调理工艺制备出一系列不同调理程度的草鱼片，采用显微照相、质构分析、组织切片等技术，分析测定不同调理程度的调理鱼片的组织结构、质构特性及感官品质，研究鱼片组织结构、质构特性与“蒜瓣肉”结构的关联作用，定义和表征调理鱼片“蒜瓣肉”结构特征，制订调理鱼片“蒜瓣肉”结构评价方法，为合理评价调理鱼片“蒜瓣肉”结构奠定基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 原料

草鱼，华中农业大学农贸市场，每尾体质量3.0~3.5 kg；食盐，食品级，湖北盐业集团有限公司。

1.1.2 主要试验试剂

冰醋酸、丙酮、锇酸、环氧树脂、磷钼酸、磷酸、戊二醛，分析纯，国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

D7000 型数码相机，日本 NIKON 公司；H-7650 型透射电子显微镜，日本 HITACHI 公司；LEICA DEM 型显微成像系统，上海徕卡显微系统有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 鱼片的调理处理

鲜活草鱼两侧片去皮鱼肉并冲洗干净，再用吸水纸吸去表面水分，称量鱼片质量。在预实验的基础上，通过控制食盐添加量、调理温度和时间制备出不同调理程度、不同“蒜瓣肉”结构的典型样品 12 组，具体参数见表 1。每组样品选用鱼片 3 片草鱼，将不同用量食盐均匀涂抹在鱼片表面，置于真空袋中真空包装并于指定温度条件下进行调理（静置），调理一定时间后立即取样。其中，1 片立即测定样品的质构特性，1 片置于固定液中待后续观测鱼肉的组织结构，另 1 片于液氮中浸渍冻结 5 min 后置于-18 ℃冷库中贮藏备用。进行感官评价和图像采集前将冻藏的鱼片隔沸水蒸 15 min，自然冷却 30 min 后进行图像采集和感官评价。

表 1 不同调理程度草鱼片典型样品的制备条件

Table 1 Preparation conditions of typical grass carp fillets with different conditioned degrees

样品标号		食盐添加量/%	调理温度/℃	调理时间/d
食盐添加量	S1	0	4	5
	S2	2	4	5
	S3	4	4	5
	S4	6	4	5
调理温度	T1	3	0	5
	T2	3	4	5
	T3	3	10	5
	T4	3	15	5
调理时间	D1	3	4	0
	D2	3	4	3
	D3	3	4	6
	D4	3	4	9

1.3.2 样品图像采集

将蒸煮后的调理鱼片样品置于黑色底板上，采用 NIKON D7000 数码相机拍摄样品图像。

1.3.3 感官评价

将蒸煮 15 min 后的样品进行随机标号，在 20 ℃下选择 10 名经过培训的感官评价员对调理鱼的“蒜瓣肉”结构、外观形态和口感指标进行评价。样品由专人呈送给评价员，试验按照表 2 的标准进行评价，每个测试样品的感官评分数据去掉最高和最低评分后取算术平均值。

1.3.4 质构特性测定

参考 Liu 等[11]的方法，使用 TA.XT 物性测试仪测定。将样品切成 2 cm×2 cm×1 cm 的小块，使用质地剖面分析（TPA）模式测定，每个样品进行 2 次轴向

压缩，压缩比为 50%，测试探头为 P/36R 平底圆柱形探头（直径 36 mm），测前速度为 5 mm/s，测中速度为 1 mm/s，测后速度为 1 mm/s，触发点负载为 5.0 g。每块样品测 1 次，取 6 块样品的平均值。

表 2 调理鱼的感官评价指标及评分标准

Table 2 Sensory evaluation index and scoring standard of conditioned fillets

类别	评分标准	分值
“蒜瓣肉”结构形态	肉质不整齐，用筷子不能将骨肉分离，无蒜瓣状形成	1~2
	肉质基本整齐，用筷子不能将骨肉分离，蒜瓣状不完整	3~4
	肉质基本整齐，用筷子基本能将骨肉分离，蒜瓣状较完整	5~6
	肉质较整齐，用筷子能将骨肉分离，蒜瓣状较完整	7~8
	肉质整齐，用筷子能将骨肉分离，有完整蒜瓣状	9~10
外观形态	表面干燥、颜色暗淡	1~2
	表面较干燥、颜色较暗淡	3~4
	表面稍干燥、颜色稍暗淡	5~6
	表面稍干燥、略有光泽	7~8
	表面不干燥、光泽自然	9~10
口感	肉质过于松散或过硬、不爽滑	1~2
	肉质较松散或较硬、不爽滑	3~4
	肉质稍松散或稍硬、爽滑	5~6
	肉质较松散或较紧实、爽滑	7~8
	肉质紧实程度适中、柔嫩爽滑	9~10

1.3.5 Masson 石蜡切片染色法

参照 Caballero 等[12]的方法并略作修改。将鱼肉切成 8 mm×8 mm×3 mm 的小块，于 4 ℃下用 10%的甲醛溶液固定 48 h，然后乙醇梯度脱水 15 min，再用二甲苯浸泡取代。随后，将样品包埋石蜡切片，在水中展开后转移到载玻片上，在 60 ℃烘箱中烘干 1 h，用二甲苯脱蜡，再用 φ=100%、95%、80%的乙醇梯度洗脱 2 次，用水冲洗 5 min。用 Weigert 氏铁苏木素染色 5 min，流水冲洗，1%的盐酸酒精分化 10 s，流水冲洗至反蓝，然后用丽春红酸性品红液染色 5 min，流水冲洗，1%的磷钼酸水溶液分化 5 min，再用苯胺蓝液复染 5 min，1%的冰醋酸分化 1 min。用 φ=95%、100%的乙醇脱水两次，用二甲苯溶解石蜡，使切片透明，再用中性树胶封片后观察拍照。

1.3.6 肌间距离和肌纤维面积测定

按照 Davila 等[13]的方法对显微图片进行阈值化和二值化处理，采用图像分析软件 Image J 1.42q 对图片进行处理，计算其肌间距离和肌纤维面积。

1.3.7 透射电镜观察

参考 Li 等[14]的方法并略作修改。将 1 mm×1 mm×1 mm 鱼肉于 4 ℃下用 2.5%的戊二醛溶液固定 48 h 后用 0.1 mol/L 的磷酸缓冲液漂洗 3 次，每次 10 min。再用 1%的锇酸溶液固定 1 h，然后用 φ=70%、80%、95%、100%乙醇梯度脱水 10 min，最后用纯丙酮脱水 20 min。在丙酮和环氧树脂（V/V=1/1）的混合液中室温浸泡 1 h，再用环氧树脂包埋 48 h。将上述样品进行超薄切片后用醋酸双氧铀和柠檬醋酸铅染色 15 min，随后用透射电子显微镜观察并拍照。

1.4 数据处理

以“平均值±标准差”表示。采用 SPSS 23 进行 ANOVA 方差分析及 Duncan’s 检验，P<0.05、P<0.01 分别代表差异显著、极显著）。

2 结果与分析

2.1 调理鱼片的形态和感官品质

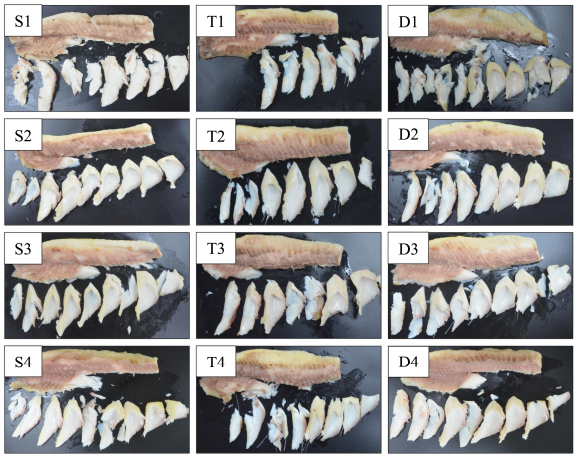

图 1 调理鱼片的形态

Fig.1 Appearance of conditioned fillets

图 1 和表 3 分别为 12 种典型调理草鱼片的形态和感官评分表。样品 S1 无法从整片鱼上剥离出完整的鱼肉瓣，破裂成形状不一的碎片，边缘呈毛刺状，凹面内没有光泽，说明 S1 没有形成“蒜瓣肉”结构。样品 S4、T1、T4、D1、D2 能够从整片鱼上剥离出鱼肉瓣，但也有少数小碎片，边缘有少许毛刺，凹面内有光泽，说明 S4、T1、T4、D1、D2 能够形成“蒜瓣肉”结构，但其形态不佳。S2、S3、T2、T3、D3、D4 这几组样品能够从整片鱼上剥离出鱼肉瓣，几乎没有出现破裂，边缘无毛刺出现，凹面内光泽明显，形状呈圆弧形，似蒜瓣状，说明这些样品形成的“蒜瓣肉”结构较好。

表 3 调理鱼片的感官评分

Table 3 Sensory score of conditioned fillets

样品	“蒜瓣肉”结构	外观形态	口感
S1	3.57±1.27^{e}	4.43±2.07^{b}	3.43±1.62^{d}
S2	7.43±1.40^{abc}	7.14±1.68^{a}	7.86±1.35^{a}
S3	7.71±1.80^{abc}	7.71±1.80^{a}	7.00±1.73^{ab}
S4	6.43±0.79^{bcd}	7.57±0.53^{a}	6.71±1.80^{ab}
T1	6.71±1.38^{bcd}	7.29±0.76^{a}	5.57±0.98^{bc}
T2	8.43±1.13^{a}	7.71±1.50^{a}	7.29±1.11^{ab}
T3	7.71±1.11^{abc}	7.00±1.29^{a}	5.86±1.57^{bc}
T4	5.43±1.13^{d}	7.14±1.21^{a}	5.57±1.27^{bc}
D1	6.14±1.77^{cd}	6.43±1.90^{a}	4.57±1.27^{cd}
D2	6.71±0.76^{bcd}	6.86±1.35^{a}	6.86±1.35^{ab}
D3	7.86±1.21^{ab}	7.14±1.21^{a}	6.57±1.72^{ab}
D4	7.14±1.07^{abc}	7.86±0.90^{a}	6.57±1.62^{ab}

注：同列右肩不同字母表示差异显著（P<0.05），下同。

由表 3 可知，从外观形态和口感评分来看，S1 样品的得分显著低于其他 11 组样品（P<0.05），说明样品 S1 整体感官品质较差。而 S2（食盐添加量 2%，调理温度 4 ℃，调理时间 5 d）、S3（食盐添加量 4%，调理温度 4 ℃，调理时间 5 d）、T2（食盐添加量 3%，调理温度 4 ℃，调理时间 5 d）、D3（食盐添加量 3%，调理温度 4 ℃，调理时间 6 d）、D4（食盐添加量 3%，调理温度 4 ℃，调理时间 9 d）调理鱼片样品的感官评分中“蒜瓣肉”结构得分均大于 7.00，其口感评分均在 6.50 以上，说明，具有典型“蒜瓣肉”结构调理鱼片的口感也较好。

2.2 调理鱼片的质构特性

表 4 显示了不同调理鱼样品的硬度、弹性、咀嚼性、回复性和粘附性值。在 12 组样品中，无法剥离出“蒜瓣状“的样品 S1 的硬度值仅为 2 703.09 g，同时，T1 和 D2 的硬度值低于 S1，而其他 9 组样品的硬度值在 2 800 g~4 000 g 之间，均高于 S1。样品 S4 的弹性值仅为 0.47，低于其他 11 组（0.55~0.75）；除 S1 外其他 11 组样品的咀嚼性值均在 580 g~1 300 g 之间、回复性值均在 0.24~0.35 之间、粘附性均在 160 g·sec ~350 g·sec 之间，而样品 S1 的咀嚼性、回复性和粘附性值显著低于其他 11 组样品（P<0.05），分别为 1 560.33 g、0.17 和 85.61 g·sec。感官评价较好的 5 组样品硬度值在 2 800 g~3 500 g，弹性值在 0.56~0.74，咀嚼性在 600 g~1 300 g，回复性值在 0.24~0.35，粘附性在 240 g·sec~350 g·sec 范围内。在其他调理鱼制品的研究中也发现口感较好的鱼片应质地软弹适中，在适宜的料液比、较高的真空度和恰当的调理时间下，硬度在 3 500 g~4 300 g、咀嚼性在 500 g~1 000 g 的调理鱼片的口感软弹适中，品质较好[15,16]，可见，适宜的调理处理能够获得品质较好的鱼片，而形成“蒜瓣肉”结构的调理鱼片品质与其相符。

表 4 调理鱼片的质构特性

Table 4 Texture characteristics of conditioned fillets

样品	硬度/g	弹性	咀嚼性/g	回复性	粘附性/(g·sec)
S1	2 703.09±332.26^{cd}	0.55±0.05^{bc}	560.33±173.42^{d}	0.17±0.01^{d}	85.61±19.36^{g}
S2	2 873.83±207.45^{c}	0.73±0.13^{a}	801.75±80.33^{bc}	0.25±0.02^{bc}	344.14±32.03^{a}
S3	2 966.96±311.24^{c}	0.56±0.03^{bc}	618.71±149.56^{c}	0.24±0.02^{c}	240.42±33.77^{cde}
S4	3 126.87±293.63^{bc}	0.47±0.05^{c}	585.37±124.38^{c}	0.24±0.02^{c}	168.53±23.27^{f}
T1	2 748.84±409.53^{cd}	0.60±0.03^{abc}	964.80±154.36^{bc}	0.25±0.02^{bc}	264.33±49.37^{bcde}
T2	3 129.06±365.70^{bc}	0.56±0.02^{bc}	925.43±132.64^{bc}	0.26±0.03^{bc}	282.51±40.79^{bc}
T3	3 113.10±114.33^{bc}	0.72±0.15^{a}	948.63±132.64^{bc}	0.26±0.04^{bc}	279.02±31.27^{bc}
T4	3 785.41±233.30^{a}	0.75±0.04^{a}	959.62±71.08^{bc}	0.25±0.01^{bc}	203.97±10.88^{ef}
D1	3 516.03±352.65^{ab}	0.63±0.13^{ab}	925.25±220.12^{bc}	0.28±0.04^{b}	218.46±12.60^{de}
D2	2 359.93±138.97^{d}	0.68±0.13^{ab}	946.38±187.63^{bc}	0.26±0.03^{bc}	249.07±46.05^{bcd}
D3	3 141.41±419.33^{bc}	0.73±0.12^{a}	1 169.08±132.22^{ab}	0.32±0.03^{a}	282.57±37.07^{bc}
D4	3 465.59±135.22^{ab}	0.74±0.17^{a}	1 302.69±251.58^{a}	0.35±0.04^{a}	293.28±39.67^{b}

2.3 调理鱼片的微观组织结构

微观结构的变化会导致鱼肉质地的变化，进而影响鱼肉的表观形态和感官品质[17]。石蜡包埋肌肉组织切片能够直观地反映出调理鱼肌肉组织的微观结构，清晰地展示肌纤维和肌内膜的结构[18]。12 组鱼片样品的肌肉组织结构横切面和纵切面图分别见图 2 和图 3，其肌肉中的肌纤维平均面积和平均肌间距离测量结果见表 5。图 2 中显示为深色的部分是肌纤维，白色部分为肌纤维间隙，在肌纤维间隙中存在着胶原。胶原纤维属于肌肉的结缔组织，胶原蛋白是胶原纤维的主要成分，胶原蛋白构成了肌细胞的各种膜结构[19,20]。由图 2 鱼肉的横切面可知，S1~S4 和 T1~T4 这两组样品的肌纤维面积变化程度较小，而 D1~D4 样品的肌纤维面积变化程度较大，说明调理时间对调理鱼片的肌纤维面积影响程度高于食盐添加量和调理温度。样品 D1 的鱼肉组织内肌纤维间紧密相连，且胶原蛋白含量较高，D2、D3、D4 样品肌纤维间的距离越来越大，肌纤维之间发生分离，且 D2、D3、D4 样品图中的丝状膜结构逐渐变少，即鱼肉组织中的胶原蛋白含量下降。

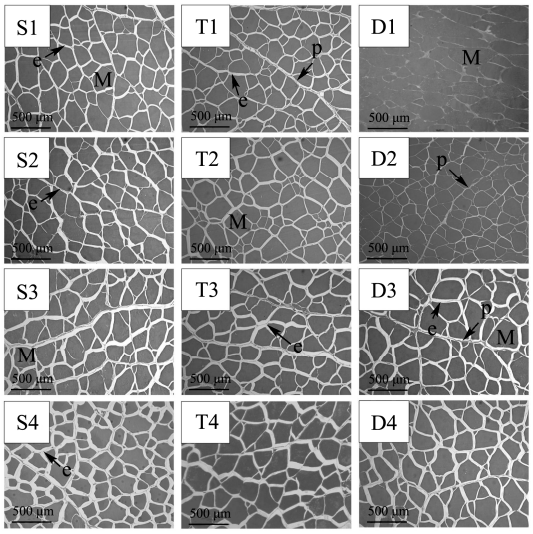

图 2 调理鱼片经 Masson 染色后横切面的组织结构

Fig.2 Tissue structure of cross section in conditioned fillets after Masson staining (Magnification: 100×)

注：e 为肌内膜，p 为肌束膜，M 为肌纤维。

肌纤维面积能够反映动物肌肉品质和产肉率[21]，肌纤维间隙反映肌纤维间的紧密程度，肌肉嫩度与肌纤维间距呈负相关关系[22]。观察图 3 鱼片的纵切面可以清晰地看出肌纤维与其周围的膜结构之间的关系。食盐添加量、调理温度和调理时间均对调理鱼肌肉的肌纤维结构有影响，样品 S1 的鱼肉肌纤维和周围的结缔组织之间连接紧密，肌纤维排列整齐。样品 S4 和 D4 鱼肉肌纤维之间的间隙很大，说明肌纤维和周围的肌内膜发生分离，同时肌纤维间隙大小不均一，这是因为肌原纤维蛋白在较高盐浓度和较长时间下会发生自溶或降解，导致肌纤维间距变大，同时肌内膜等膜结构降解，会进一步导致鱼肉质地的变化[23]，与陈跃文等在研究不同处理方式对鲟鱼肉肌肉结构影响时观察到的现象一致[24]。

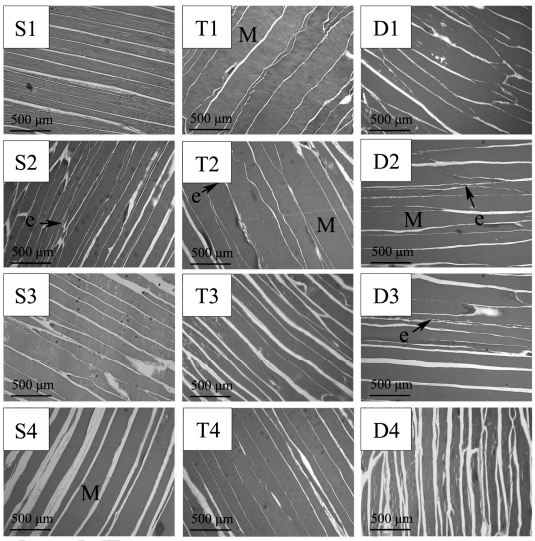

图 3 调理鱼片经 Masson 染色后纵切面的组织结构

Fig.3 Tissue structure of longitudinal section in conditioned fillets after Masson staining (Magnification: 100×)

注：e 为肌内膜，M 为肌纤维。

表 5 调理鱼片的肌纤维面积和肌间距离

Table 5 Muscle fiber area and intermuscular distance of conditioned fillets

样品	肌纤维面积/μm^2	肌间距离/μm
S1	32 936±9 374^{b}	15.06±5.16^{def}
S2	29 590±8 945^{bc}	18.10±9.46^{cde}
S3	24 608±8 413^{de}	18.15±6.29^{cde}
S4	21 851±6 672^{e}	45.67±6.26^{a}
T1	25 223±9 337^{cde}	11.73±3.85^{f}
T2	24 032±8 452^{de}	14.78±4.26^{def}
T3	22 113±7 818^{e}	14.84±7.90^{def}
T4	32 118±5 185^{b}	20.18±6.37^{cd}
D1	38 965±9 161^{a}	13.05±5.49^{ef}
D2	31 950±9 649^{b}	17.51±6.50^{cde}
D3	28 313±8 626^{bcd}	20.91±8.48^{c}
D4	26 135±6 337^{cde}	33.72±5.77^{b}

通过比较不同样品之间的肌纤维面积和肌间距离（表 5）可以发现，在 12 组样品中 D1 样品的肌纤维面积最大，为 38 965 μm^2，相应的肌间距离则较小，为 13.05 μm。而其余形成“蒜瓣肉”结构较好的样品的肌纤维面积均在 24 000 μm^2~33 000 μm^2 之间，肌间距离则大于 14 μm。S4 的肌纤维面积最小（21 851 μm^2），

肌间距离显著大于其他样品，为 45.67 μm。由表 5 可知，随着调理时食盐添加量的增加、调理时间的延长，鱼肉组织的肌纤维面积均显著变小、肌间距离显著变大（P＜0.05）。这可能是由于在鱼肉调理过程中适宜的温度下钙激蛋白酶酶活较高，降解肌原纤维蛋白使肌纤维结构破裂，导致鱼肉肌纤维和与其周围的肌内膜、肌束膜等富含胶原蛋白的膜结构之间分离程度变大，表现为肌间距离越变大[25]。同时，在渗透压的作用下，肌纤维收缩导致肌纤维面积不断减小[26]。可见，调理鱼制品中瓣瓣分离片层结构的形成与肌纤维之间间距变大有着一定的联系。

2.4 调理鱼片的超微组织结构

透射电子显微镜（TEM）具有更高的分辨率，能够清晰地观察到鱼肉的肌纤维结构。光学显微镜观察组织切片的结果可以从宏观角度研究鱼肉组织结构的变化，而 TEM 则能够观察到肉眼不可见的鱼肉的超微结构，从更深层次分析鱼肉宏观结构和品质变化的原因。鱼肉肌纤维是一种由粗丝（Thick filament）、细丝（Fine filament）高度有序地轴向排列而成的条纹结构，粗丝有序地排列成暗带（A 带），细丝有序地排列成明带（I 带）。A 带的中心称为 H 区，A 带的中心有一条连接肌球蛋白的 M 线；I 带的中心则是一条 Z 线，Z 线能够协调各个肌纤维之间的收缩[27,28]。

12 组调理鱼片样品的纵切面超微组织结构观察结果（TEM 照片）见图 4。没有形成“蒜瓣肉”结构的样品 D1、S1 的肌节结构尚且完整，尤其是在调理 0 d 时（D1），新鲜状态的鱼肉肌纤维结构排列整齐、均匀紧密，能清晰地观察到完整的肌纤维以及肌节的 A 带、I 带、M 线和 Z 线，这与 2.3 中观察到的现象一致，样品 D1 的肌纤维结构致密，肌间距离较小，肌纤维间紧密相连，这也是新鲜鱼肉的肌纤维结构特征。而样品 T1 则无法观察到肌节和肌纤维结构，这可能是由于在 0 ℃条件下鱼肉微冻，骨架蛋白降解使鱼肉肌纤维结构松散[29]。形成“蒜瓣肉”结构的鱼肉肌节结构完全消失，这一现象与 2.1 中鱼片表现出的瓣状剥离现象一致，调理鱼片的肌纤维和肌节各条带均已无法观察到，Z 线消失，肌浆网溶解，囊泡分散在组织各处，说明调理处理对鱼肉肌纤维结构有显著影响，这可能是由于钙激蛋白酶使肌动蛋白裂解，从而造成了对 Z 线和中间丝的破坏[19]，在其他调理鱼制品的研究中也报道了肌纤维结构破裂和 Z 线裂解的情况[27]。样品 S4 和 T4 的超微结构中只能观察到肌浆网，且相互聚集，肌纤维间已没有完整的膜结构束缚，因此无法形成完整的“蒜瓣肉”结构，这与 2.3 中观察到的肌纤维与膜结构分离的现象一致，这可能是因为钙激蛋白酶作用于肌小节、结蛋白和细丝蛋白，这 3 类蛋白的降解破坏了肌原纤维的有序结构[30]。

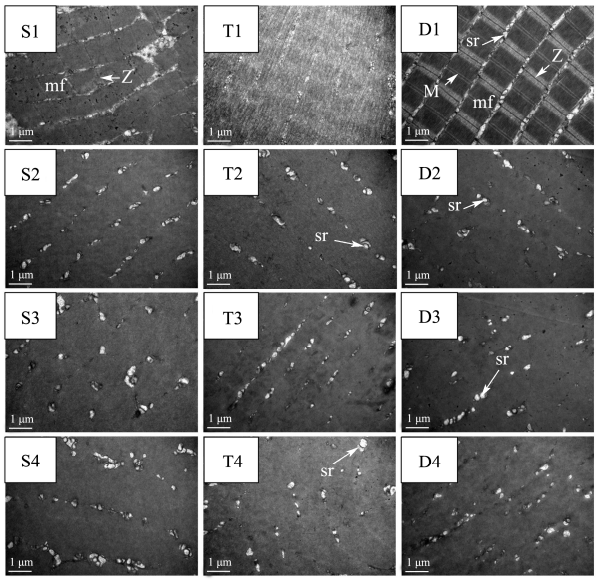

图 4 调理鱼片的微观组织结构 TEM 照片

Fig.4 Transmission electron microscope photos of microstructure in conditioned filllets (Longitudinal, magnification: 20 000×)

注：sr 为肌质网；mf 为肌纤维；M 为 M 线；Z 为 Z 线。

2.5 调理鱼片“蒜瓣肉”的感官品质-质构参数-结构特性间相关性分析

表 6 调理鱼片“蒜瓣肉”的感官品质-质构参数-结构特性间相关性分析

Table 6 Correlation analysis among sensory quality, texture parameters and structural characteristics of "garlic clove-like meat" in conditioned fillets

评价指标	r	P
硬度-TPA	0.22	0.04
弹性-TPA	0.03	0.77
咀嚼性-TPA	0.20	0.07
回复性-TPA	0.17	0.11
粘附性-TPA	0.63	<0.01
肌纤维面积-组织结构	-0.41	<0.01
肌间距离-组织结构	0.13	0.26

注：P<0.05 表示两指标间显著相关，P<0.01 表示两指标间极显著相关。

为了解调理鱼片质构参数和结构特性对鱼片“蒜瓣肉”结构的贡献程度，将各样品感官品质中的“蒜瓣肉”结构评分与样品的质构参数、结构特性进行相关性分析，“蒜瓣肉”结构评分与各指标间相关性分析的皮

尔逊相关系数 r 和 P 值见表 6。

由表 6 可知，调理鱼片的粘附性和肌纤维面积与“蒜瓣肉”结构感官评分呈现极显著相关性（$P<0.01$），鱼片的硬度与感官评分呈显著相关性（$P<0.05$），而鱼片弹性、咀嚼性、肌间距离与感官评分之间没有相关性（$P>0.05$）。调理鱼“蒜瓣肉”结构感官评分与鱼肉的硬度和粘附性值呈正相关关系，与肌纤维面积则呈负相关。Tang 等[27]研究发现，鱼肉的粘附性与肌联蛋白、伴肌动蛋白的降解呈显著正相关，而与鱼肉的不易流动水、自由水的含量呈显著负相关。

2.6 调理鱼片“蒜瓣肉”结构的定义及等级评价标准

将 2.5 中筛选出的“蒜瓣肉”结构感官评分、外观形态、口感得分进行标准化后，采用 Euclidean 平方距离法对 12 个典型样品进行聚类分析，得到分类结果见图 5。在欧氏距离为 3 时，可将 12 个调理鱼片样品“蒜瓣肉”结构品质可分为 3 类：第Ⅰ类（优）、第Ⅱ类（良）和第Ⅲ类（差）。分类情况如下：第Ⅰ类（优）：T2、D4、S3、S2、T3、D3；第Ⅱ类（良）：T1、S4、T4、D1、D2；第Ⅲ类（差）：S1。

综合上述实验，将属于“优”等级的样品（T2、T3、D3、D4、S2、S3）的各指标和结构特征归纳，总结出调理鱼制品“蒜瓣肉”结构的定义：

“蒜瓣肉”结构是指以各种鱼为原料，经调理加工、蒸煮后所形成的一种结构，外观上鱼肉片与片之间可分离、片层之间无毛刺，口感上爽弹嫩滑，形成“蒜瓣肉”结构的鱼肉质构硬度参数为 2 600~3 300 g、弹性为 0.56~0.74、咀嚼性为 600~1 300 g，回复性为 0.24~0.32，粘附性为 240~350 g·sec，鱼肉肌纤维面积为 24 000~32 000 μm^2，肌间距离为 16~21 μm。

归纳出的调理鱼片“蒜瓣肉”结构的等级评价标准如表 7 所示。

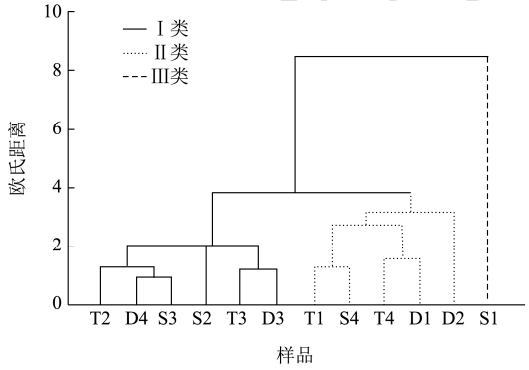

图 5 调理鱼片“蒜瓣肉”等级分类结果

Fig.5 Classification results of "garlic cloves-like meat" structure in conditioned fillets

表 7 调理鱼片“蒜瓣肉”结构的等级评价标准

Table 7 Standard for grade evaluation of "garlic clove-like meat" structure in conditioned fillets

评价指标	等级		
	优	良	差
能否形成“蒜瓣肉”结构	能	能	不能
外观形貌	“蒜瓣”形状完整，片与片之间分离，拨开后鱼片形状完整。	“蒜瓣”形状较完整，片与片之间不能清楚的分离，拨开后鱼肉破碎。	未出现“蒜瓣”形状，片与片之间粘连紧密，拨开后鱼片破碎，无法形成片状。
口感	爽弹嫩滑、肉质紧密	肉质稍松散、爽滑	肉质松散、不爽滑
质构特性	硬度：2 600~3 300 g 弹性：0.56~0.74 咀嚼性：600~1 300 g 回复性：0.24~0.32 粘附性：240~350 g·sec	硬度：2 300~3 400 g 弹性：0.55~0.75 咀嚼性：580~1 300 g 回复性：0.24~0.35 粘附性：160 ~360 g·sec	硬度：<2 300 g 或>3 400 g 弹性：<0.55 或>0.75 咀嚼性：<580 g 或>1 300 g 回复性：<0.24 或>0.35 粘附性：<160 g·sec 或>360 g·sec
肌纤维结构	肌纤维面积：24 000~32 000 μm^2 肌间距离：16~21 μm	肌纤维面积：<33 000 μm^2 肌间距离：14~30 μm	肌纤维面积：>33 000 μm^2 肌间距离：<14 μm

3 结论

通过控制食盐添加量、调理温度和时间制备了 12 组典型的调理鱼样品，相关性分析结果显示，调理鱼片“蒜瓣肉”结构的感官评分与质构指标中的硬度值呈显著正相关（$P<0.05$）、与粘附性值呈极显著正相关（$P<0.01$），而与肌纤维面积呈极显著负相关（$P<0.01$）。归纳各等级样品的感官特征、TPA 参数与组织结构参数，可给出“蒜瓣肉”结构的初步定义：“蒜瓣肉”结构是指以鱼为原料，经调理加工、蒸煮后所形成的一种

特殊结构，外观上鱼肉片与片之间可分离、片层之间光滑无毛刺，口感爽弹嫩滑，色泽明亮。聚类分析结果显示，调理鱼片“蒜瓣肉”结构的品质可分为优、良、差 3 个等级：优和良等级代表调理鱼片有“蒜瓣肉”结构，差等级表示调理鱼无“蒜瓣肉”结构。“蒜瓣肉”结构“优”的调理鱼片质构和组织结构参数为：硬度参数为 2 600~3 300 g、弹性为 0.56~0.74、咀嚼性为 600~1 300 g，回复性为 0.24~0.32，粘附性为 240~350 g·sec，鱼肉肌纤维面积为 24 000~32 000 μm^2，肌间距离为 16~21 μm。本实验有望为合理评价调理鱼片的“蒜瓣肉”结构提供指导，并为制备具有良好“蒜瓣肉”结构的调理鱼片提供技术参考。

参考文献

[1] 刘子依.预制菜变身“潜力股”[J].中国品牌,2022,3:50-51

[2] 李想,任章睿,胡杨,等.液氮冻结温度对调理草鱼片品质的影响[J].华中农业大学学报,2021,40(4):200-208

[3] 李娜,蔡鲁峰.调理食品及其发展现状与趋势探讨[J].粮食与食品工业,2020,27(1):31-34

[4] Kobayashi F, Kimura R, Aoki R, et al. Effect of various seasonings on the quality retention of dried mackerel (*Scomberscombrus*Linnaeus) [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(8): e15476

[5] Qiu X, Wu Y. Application of taguchi method to improve the sous vide processed large yellow croaker (*Larimichthys crocea*) fillet product quality during cold storage [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(6): e15565

[6] 王浩文,王传明,王红强,等.不同青菜品种对老坛酸菜鱼调料风味的影响[J].中国调味品,2022,47(4):160-163

[7] 韦佩贝,戚穗坚.疫情全球化常态化趋势下中国预制调理食品市场发展现状[J].食品与机械,2020,36(9):18-25

[8] 雷跃磊,卢素芳,张光华,等.湖北风味发酵鳜鱼加工关键工艺[J].食品工业科技,2018,39(16):155-160

[9] 周迎芹,鄢嫣,殷俊峰,等.发酵方式对黄山臭鳜鱼菌群组成及挥发性物质的影响[J].肉类研究,2019,33(10):36-43

[10] 杨召侠,刘洒洒,高宁,等.臭鳜鱼发酵工艺优化及挥发性风味物质分析[J].中国食品学报,2019,19(5):253-262

[11] Liu D, Liang L, Xia W, et al. Biochemical and physical changes of grass carp (*Ctenopharyngodonidella*) fillets stored at -3 ℃ and 0 ℃ [J]. Food Chemistry, 2013, 140(1-2): 105-114

[12] Caballero M J, Betancor M, Escrig J C, et al. Post mortem changes produced in the muscle of sea bream (*Sparus aurata*) during ice storage [J]. Aquaculture, 2009, 291(3-4): 210-216

[13] Davila E, Pares D. Structure of heat-induced plasma protein gels studied by fractal and lacunarity analysis [J]. Food Hydrocolloids, 2007, 21(2): 147-153

[14] Li D, Zhu Z, Sun D. Effects of freezing on cell structure of fresh cellular food materials: a review [J]. Trends in Food Science & Technology, 2018, 75: 46-55

[15] 任章睿,熊善柏,胡杨,等.真空浸渍处理对调理草鱼片品质的影响[J].食品安全质量检测学报,2020,11(12):3831-3839

[16] 陈澄,胡杨,安玥琦,等.浸渍液组成与调理工艺对调理草鱼片品质的影响[J].肉类工业,2020,5:25-35

[17] Fuentes A, Fernandez-Segovia I, Serra J, et al. Effect of partial sodium replacement on physicochemical parameters of smoked sea bass during storage [J]. Food Science & Technology International, 2012, 18(3): 207-217

[18] 关海红.淡水鱼类组织切片及定向包埋技术[J].水产学杂志,2003,16(2):44-47

[19] Bao Y, Wang K, Yang H, et al.Protein degradation of black carp (*Mylopharyngodonpiceus*) muscle during cold storage [J]. Food Chemistry, 2020, 308: 125576

[20] Liu J, Yang F, Gao P, et al. The impact of crucial protein degradation in intramuscular connective tissue on softening of ice-stored grass carp (*Ctenopharyngodonidella*) fillets [J]. International Journal of Food Science and Technology, 2021, 56(7): 3527-3535

[21] 朱砺,李学伟,李芳琼,等.肌纤维生长的影响因素分析[J].四川农业大学学报,2002,1:37-39

[22] 胡新旭,赵丽红,张勇,等.肌纤维特性与肉品质关系的研究进展[J].饲料研究,2012,3:12-15

[23] Liu R, Zhao S, Xiong S, et al. Role of secondary structures in the gelation of porcine myosin at different pH values [J]. Meat Science, 2008, 80(3): 632-639

[24] 陈跃文,刘飞建,祁立波,等.真空低热烹饪对鲟鱼肉物性品质及微观结构的影响[J].中国食品学报,2020,20(6):114-121

[25] 徐慧.酱鸭加工过程中肌肉质构,显微结构以及肌肉蛋白降解的变化[D].南昌:南昌大学,2014

[26] Jiang X, Jia R, Nakazawa N, et al. Changes in protein properties and tissue histology of tuna meat as affected by salting and subsequent freezing [J]. Food Chemistry, 2019, 271: 550-560

[27] Tang M, Dai H, Ma L, et al. Degradation of structural proteins and their relationship with the quality of mandarin fish (*Sinipercachuatsi*) during post-mortem storage and cooking [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2020, 55(4): 1617-1628

[28] Ertbjerg P, Puolanne E. Muscle structure, sarcomere length and influences on meat quality: a review [J]. Meat Science, 2017, 132: 139-152

[29] 贾胜男,杨方,臧金红,等.骨架蛋白降解对冰鲜草鱼质构的影响[J].食品科学,2019,40(13):1-7

[30] 徐晨晨,罗海玲.钙蛋白酶系统对肌肉系水力的影响研究进展[J].肉类研究,2015,29(6):29-32