

袁可怡, 赵甜甜, 焦文娟, 等. 不同烹饪方式对金鲳鱼片品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(12): 81-90. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070006

YUAN Keyi, ZHAO Tiantian, JIAO Wenjuan, et al. Effects of Different Cooking Methods on the Quality of Golden Pomfret Fillets[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(12): 81-90. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070006

· 研究与探讨 ·

# 不同烹饪方式对金鲳鱼片品质的影响

袁可怡<sup>1</sup>, 赵甜甜<sup>2</sup>, 焦文娟<sup>2</sup>, 刘俊<sup>2</sup>, 周芳<sup>2</sup>, 刘伟峰<sup>2</sup>, 张业辉<sup>2,\*</sup>, 彭岚清<sup>3</sup>, 南海军<sup>1,\*</sup>, 陈晓瑛<sup>4</sup>

(1. 广东药科大学中药学院, 广东广州 510006;

2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室,  
广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610;

3. 广东供销绿色农产品生产供应基地运营有限公司, 广东惠州 516100;

4. 广东省农业科学院动物科学研究所, 广东广州 510645)

**摘要:** 为探究不同烹饪方式条件下金鲳鱼片品质特性变化的差异, 对比研究蒸制、水煮、烤制 3 种常用的烹饪方式对金鲳鱼片的热加工损失率、色差、pH、基本营养成分、质构特性、脂肪酸、游离氨基酸、挥发性风味成分的影响。结果表明, 3 种方式烹饪的金鲳鱼片热加工损失率均随加热时间延长呈上升趋势。与生鱼肉对比, 水煮和蒸制鱼片的颜色变亮白, 烤制 8 min 的鱼片色泽最焦黄。经烹饪后鱼片的 pH 均有显著增加 ( $P < 0.05$ )。水煮组的水分含量最高, 烤制组的水分含量最低而灰分和粗蛋白含量最高, 蒸制 8 min 的粗脂肪含量最低为 4.93 g/100 g。相比于蒸制和水煮, 烤制鱼片的硬度和咀嚼性最大为 297.50 g、136.18 mJ, 口感较为丰富。蒸制鱼肉中饱和脂肪酸 (SFA)、单不饱和脂肪酸 (MUFA) 含量最高分别为 33.83%、37.80%, 烤制鱼肉的膳食脂肪酸比例为 1.08:1.21:1.04 更符合 FAO/WHO 推荐的健康要求。金鲳鱼肉游离氨基酸总量经加热后有所降低, 而烤制氨基酸总量达 203.78 mg/100 g, 说明烤制处理对鱼片游离氨基酸含量的保持表现更好。新鲜、蒸制、水煮、烤制的鱼肉样品中分别鉴定出 35、36、40、32 种挥发性物质, 这表明加热处理能产生更多的挥发性风味物质种类, 在一定程度上赋予了金鲳鱼片新的风味。本研究为金鲳鱼的食品加工业提供参考。

**关键词:** 金鲳鱼, 品质特性, 风味, 蒸制, 水煮, 烤制

中图分类号: TS254.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)12-0081-10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024070006

本文网刊:



## Effects of Different Cooking Methods on the Quality of Golden Pomfret Fillets

YUAN Keyi<sup>1</sup>, ZHAO Tiantian<sup>2</sup>, JIAO Wenjuan<sup>2</sup>, LIU Jun<sup>2</sup>, ZHOU Fang<sup>2</sup>, LIU Weifeng<sup>2</sup>, ZHANG Yehui<sup>2,\*</sup>,  
PENG Lanqing<sup>3</sup>, NAN Haijun<sup>1,\*</sup>, CHEN Xiaoying<sup>4</sup>

(1. School of Traditional Chinese Pharmacy, Guangdong Pharmaceutical University, Guangzhou 510006, China;

2. Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Sericulture & Agri-food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510610, China;

3. Guangdong Supply and Marketing Green Agricultural Product Production and Supply Base Operation Co., Ltd., Huizhou 516100, China;

4. Institute of Animal Science, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510645, China)

**Abstract:** To investigate the differences in the quality characteristics of golden pomfret (*Trachinotus ovatus*) fillets under

收稿日期: 2024-07-02

基金项目: 广东省重点领域研发项目 (2023B0202080003); 广东省农业科学院水产协同中心项目 (XT202303); 佛山市市院合作水产预制菜研发中心 (202401); 揭阳市惠来县鲍鱼产业链项目。

作者简介: 袁可怡 (2000-), 女, 硕士, 研究方向: 中药学, E-mail: 2049919810@qq.com。

\* 通信作者: 张业辉 (1979-), 男, 博士, 研究员, 研究方向: 水产品加工, E-mail: zhangyehg@163.com。

南海军 (1976-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 中药学, E-mail: swunan@163.com。

various cooking methods, a comparative study was conducted to analyze the impacts of three commonly used cooking methods, namely steaming, boiling, and roasting, on the thermal processing loss rate, color difference, pH, basic nutritional composition, texture properties, fatty acid profile, free amino acid content, and volatile flavor components of golden pomfret fillets. The results showed that an upward trend in the thermal processing loss rate of golden pomfret fillets was observed with increasing heating time in all three cooking methods. Compared to raw fish, the color of boiled and steamed fillets became brighter and whiter, and the most browned fillets were roasted for 8 min. There was a significant increase in the pH of all fish fillets after cooking ( $P < 0.05$ ). The boiled fish fillets had the highest moisture content, whereas the roasted fish fillets had the lowest moisture content, the highest ash and crude protein content, and the lowest crude fat content of 4.93 g/100 g for fillets steamed for 8 min. Compared with steaming and boiling, the greatest hardness (297.50 g) and chewiness (136.18 mJ) were observed in roasted fish fillets, along with a richer texture. The highest saturated fatty acid (SFA) and monounsaturated fatty acid (MUFA) contents were found in steamed fish at 33.83% and 37.80%, respectively, while the dietary fatty acid ratio of roasted fish fillets was determined to be 1.08:1.21:1.04, which was more consistent with the FAO/WHO recommended health requirements. A decrease in the total content of free amino acids in golden pomfret meat was observed after heating, while the highest total amino acid content (203.78 mg/100 g) was recorded in roasted fish fillets, indicating that free amino acid content was better preserved by roasting treatment. In fresh, steamed, boiled, and roasted fish samples, 35, 36, 40, and 32 volatile compounds were respectively identified, demonstrating that more volatile flavor compounds could be produced through heating treatments, which contributed to new flavor development in golden pomfret fillets to a certain extent. A reference for the food processing industry of golden pomfret can be provided by this study.

**Key words:** golden pomfret; quality characteristics; flavor; steaming; boiling; roasting

金鲳鱼(*Trachinotus ovatus*), 学名卵形鲳鲹, 又称黄鲳、黄鳍鲳, 金鲳鱼肉质细腻、口感鲜美、营养丰富, 成功吸引了广大消费者的青睐与热烈追捧, 成为餐桌上备受欢迎的佳肴。金鲳鱼作为近年来华南地区海洋牧场的重要养殖品种之一, 其产量快速增长。现代生活节奏的加快导致预制菜肴的需求不断增加, 随着海洋牧场中金鲳鱼养殖技术的不断成熟, 开发金鲳鱼预制菜也成为市场需求<sup>[1]</sup>。尽管我国在金鲳鱼的加工利用方面已有许多研究, 但当前的研究水平仍处于发展的起始阶段, 过去金鲳鱼的加工利用多集中在保鲜、冷冻以及风干干燥<sup>[2-3]</sup>, 一些团队还研究开发了微生物发酵鱼的方法, 以提高金鲳鱼的营养和风味, 同时延长储存期<sup>[4]</sup>。然而, 这种方法通常耗时较长, 风味不稳定, 而且安全性无法保证。因此, 将金鲳鱼经过烹饪加工处理既能保证食品的安全性又能给消费者提供更多的风味选择。

烹饪是食品加工的重要过程, 传统的烹饪方式有蒸、煮、烤等, 烹饪有助于去除鱼类中的寄生虫、病菌, 增加饮食的稳定性。在高温加热下, 经过各种化学变化, 鱼类的外表形状、营养成分、香味物质等会产生变化。不同的烹饪方法, 又因传热介质不同而对原制品质量、色泽、气味、蛋白质变化, 以及烹饪产量都有重要的影响<sup>[5-6]</sup>。彭海川等<sup>[7]</sup>发现鲷鱼肉经过煎炸和清蒸处理后干基蛋白质含量分别增加了 10.37% 和 26.27%; Chen 等<sup>[8]</sup>分析了微波、烘烤、蒸煮和煮沸对酸度调节处理罗非鱼肌肉香气特征的影响, 分别在原料和热加工罗非鱼肌肉中鉴定出 43 种和 20 种挥发性化合物, 发现热处理能减少挥发性化合物类型; Dong 等<sup>[9]</sup>探究 5 种烹饪方式对大菱鲆肌肉基本营养物质和风味物质的影响, 认为蒸制可以更

好保存鱼肉的基本营养物质, 同时产生理想的风味。随着金鲳鱼越来越多被端上餐桌, 也需要更多关于不同烹饪方式对金鲳鱼片的风味、营养和食用品质的研究。

本研究选择蒸制、水煮、烤制 3 种常用的烹饪方式, 以烹饪前后金鲳鱼肉的热加工损失率、色差、pH、质构特性、基本营养成分、脂肪酸、游离氨基酸、挥发性风味成分为指标, 比较和评价 3 种不同的烹饪方法对金鲳鱼食用品质的影响, 期望研究结果能为消费者和生产者选择较合理的金鲳鱼肉烹饪方式提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

鲜活金鲳鱼 购于广东省广州市盒马鲜生超市(质量 400~500 g/条), 超市货源自广东珠海; 氯化钾、硫酸、硫代巴比妥酸、氯仿、甲醇、硼酸、溴甲酚绿、甲基红、无水碳酸钠、氢氧化钠、石油醚等 均为分析纯, 购于广州化学试剂厂; 异辛烷、甲醇、丙酮等 均为色谱纯, 购自天津市富宇精细化学化工有限公司。

Kjeltec™ 8400 全自动凯氏定氮仪 丹麦福斯分析仪器公司; 6980N-5975B 气相色谱-质谱联用仪 美国安捷伦公司; L-8900 全自动氨基酸分析仪 日本日立公司; SX2-512-N 箱式马弗炉 上海一恒公司; CR-400 色差仪 柯尼卡美能达公司; CT-3 质构仪 美国 Brookfield 公司; SOX416 全自动索氏抽提仪 德国格哈特公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 样品处理 新鲜金鲳鱼宰杀后去除内脏、鱼骨以及鱼皮, 选取鱼背部位的肌肉, 将选取的鱼肉切

割成大小相近的鱼片, 每片约为  $4\text{ cm}\times 4\text{ cm}\times 1\text{ cm}$ 。采用蒸制、水煮和烤制 3 种方式进行烹饪, 新鲜未烹饪鱼片为对照组 CK。鱼肉在  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  下分别蒸 2、5、8 min 为蒸制组 S2、S5、S8。鱼肉在  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  沸水中分别煮 2、5、8 min 为水煮组 C2、C5、C8。烤箱  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  预热 10 min, 将鱼片放入铺有锡纸的烤盘上, 设置  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$  分别烤制 2、5、8 min 则为烤制组 B2、B5、B8。所有实验重复进行 3 次。

1.2.2 热加工损失率的测定 根据热处理前后样品质量的差异计算出金鲳鱼片的加工损失率。每个样本重复 3~5 次。根据下面公式计算热加工损失率。

$$C(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100$$

式中: C 表示热加工损失率, %;  $m_1$  表示样品热加工前质量, g;  $m_2$  表示样品热加工后质量, g。

1.2.3 色差的测定 色度计用标准白板和黑板校准后, 选取鱼肉 5 个点(4 边角 1 中心)进行色差测定, 取 5 点的平均值。在 CIE-LAB 系统中, 采用指数亮度值( $L^*$ )、红绿值( $a^*$ )、黄蓝值( $b^*$ )表色, 根据以下公式计算色度  $C^*$ 、色调角  $H^*$ 。

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

$$H^* = \frac{b^*}{a^*}$$

1.2.4 质构的测定 取完整样品, 使用 P/5 探头, 设定 TPA 模式, 测试速度为  $1\text{ mm/s}$ , 位移下压  $5\text{ mm}$ , 触发力为  $5.0\text{ g}$ , 循环次数为 2 次。

1.2.5 pH 的测定 参考 GB 5009.237-2016《食品安全国家标准 食品 pH 值的测定》规定的方法进行。

1.2.6 基本营养成分的测定 水分参照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》的直接干燥法进行测定; 灰分参照 GB 5009.4-2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》的高温灼烧法进行测定; 粗蛋白参照 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》的凯氏定氮法进行测定; 粗脂肪参照 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》的索式抽提法进行测定。

1.2.7 脂肪酸组成的测定 选取蒸制、水煮、烤制 5 min 处理的金鲳鱼肉样品进行测定。参照熊添等<sup>[10]</sup>的方法提取鱼肉脂质并用氮气吹扫以浓缩脂质, 取  $60\text{ mg}$  浓缩脂质进行甲酯化, 加  $4\text{ mL}$  异辛烷, 涡旋  $10\text{ s}$ , 加入  $200\text{ }\mu\text{L}$   $2\text{ mol/L}$  的  $\text{KOH-CH}_3\text{OH}$  溶液, 再加入约  $0.8\text{ g}$  的无水硫酸钠除水, 静置  $30\text{ min}$ , 沉淀澄清后, 吸取  $1\text{ mL}$  上清液, 过  $0.22\text{ }\mu\text{m}$  有机滤膜, 加入  $100\text{ }\mu\text{L}$   $0.5\text{ mg/mL}$  的十九烷酸甲酯内标物。

气相色谱条件: 进样口温度  $260\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 起始温度  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 保持  $1\text{ min}$ ,  $12\text{ }^{\circ}\text{C/min}$  升温至  $140\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 保持  $0\text{ min}$ ,  $3\text{ }^{\circ}\text{C/min}$  升温至  $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 保持  $11\text{ min}$ 。

质谱条件: EI 离子源, 离子源温度  $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 四级

杆温度  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 扫描质量范围:  $10\text{--}450\text{ u}$ 。

定性、定量方法: 首先, 通过对比 37 种脂肪酸甲酯混合标准品的保留时间, 进行精确的定性。随后, 借助内标法, 根据待测脂肪酸甲酯与内标物峰面积的比值, 精确计算出脂肪酸的百分含量(%)。

1.2.8 游离氨基酸的测定 选取蒸制、水煮、烤制 5 min 处理的金鲳鱼肉样品进行测定。参考侯雨雪等<sup>[11]</sup>的方法, 称取约  $2\text{ g}$  鱼肉样品添加  $10\text{ mL}$  浓度为 10% 的磺基水杨酸溶液, 匀浆, 在  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10000\text{ r/min}$  的转速离心处理  $15\text{ min}$ , 上清液和石油醚各  $4\text{ mL}$  混合振荡, 去除有机层, 取  $1\text{ mL}$  样品溶液稀释 10 倍,  $0.22\text{ }\mu\text{m}$  水相滤膜过滤, 取滤液  $1\text{ mL}$  于进样瓶中, 用全自动氨基酸分析仪进行测定。

1.2.9 挥发性风味物质成分的测定 选取蒸制、水煮、烤制 5 min 处理的金鲳鱼肉样品进行测定。参照熊添等<sup>[10]</sup>的方法, 称取  $2\text{ g}$  鱼肉于  $20\text{ mL}$  的顶空瓶中, 加入  $5\text{ g}$  的饱和氯化钠溶液混合, 并将其和  $100\text{ }\mu\text{L}$   $0.816\times 10^{-3}\text{ mg/mL}$  的 2-甲基-3-庚酮充分混合密封。将老化的 DVB/CAR PMDS( $50/30\text{ }\mu\text{m}$ ) 固相微萃取探头插入样品瓶中, 在  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  顶空萃取  $40\text{ min}$ ,  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$  下解吸  $10\text{ min}$ 。

气相色谱条件: 进气温度为  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 升温程序:  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  保持  $2\text{ min}$ ,  $6\text{ }^{\circ}\text{C/min}$  升至  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 保持  $3\text{ min}$ , 再以  $10\text{ }^{\circ}\text{C/min}$  加热至  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 保持  $3\text{ min}$ 。

质谱条件: 接口温度  $280\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 离子源温度  $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 四级杆温度  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 电子能量  $70\text{ eV}$ , 质量扫描范围  $35\text{--}350\text{ m/z}$ 。

定性和定量分析: 与 NIST11 检索谱库匹配选取相似度  $\geq 80\%$  的挥发性物质成分结合文献进行定性。根据与内标峰面积比值计算出各挥发性风味物质的含量, 结果用  $\mu\text{g/kg}$  表示。

## 1.3 数据处理

数据结果通过平均值与标准差(mean $\pm$ SD)的形式呈现, 采用 SPSS 20.0 中单因素方差分析和 Duncan 法进行数据间显著性差异分析处理,  $P < 0.05$  表示差异显著, 同时, 借助 GraphPad Prism 软件进行图表绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同烹饪方式对金鲳鱼片热加工损失率的影响

热加工损失率是指在进行食品加工过程中, 由于加热导致的蛋白质和其他营养物质流失的比例。经不同烹饪方式处理后的金鲳鱼片热加工损失率如图 1 所示。所有样品的重量在烹饪后都有所下降, 可能是因为水分、蛋白质和油脂在烹饪过程中有流失, 温度的升高使肌肉中的游离水加速被释放, 而蛋白质受热发生变性使得肌原纤维肽链中的氢键和疏水键发生断裂, 肽链展开导致大量的结合水转变为自由水, 当鱼肉中的水分累积到一定程度后, 细胞的压力升高, 排到肌肉组织外, 导致鱼肉的质量损失<sup>[12-13]</sup>。

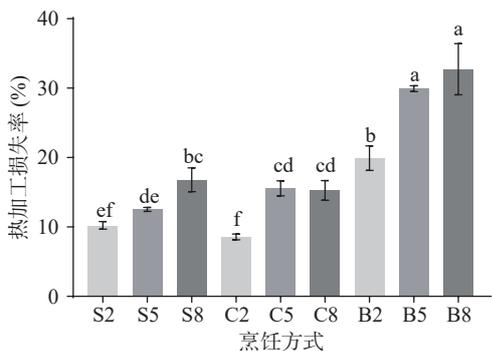


图1 不同烹饪方式对金鲳鱼片的热加工损失率

Fig.1 Heat processing loss rate of golden pomfret fillets under different cooking methods

注: 不同字母表示数据间有显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 图2同。

蒸制鱼片随着加热时间的延长, 损失率由 10.23% 增加到 16.79%。水煮 5 min 和 8 min 的鱼片热加工损失率为 15.56%、15.27%, 没有显著性差异 ( $P > 0.05$ ), 水煮 2 min 的加工损失率最小为 8.57%, 可能是因为水煮时间短, 并且汁液流失后吸收了一部分水分。烤制 8 min 的热加工损失率高达 32.72%, 因为其加热温度高达 200 °C, 水分被大量蒸发以及油脂外溢, 所以热加工损失率最大。蒸制和水煮的热加工损失率依靠水蒸气传热, 可以通过肌肉间隙迅速到达鱼肉内部, 而部分水填补了汁液流失因此损失率比烤制组低。

### 2.2 不同烹饪方式对金鲳鱼片色差的影响

食品的色泽是评价食品外观的一个重要指标, 包括颜色的明度、色调、饱和度、光泽度等方面, 而不同烹饪方式会导致肉颜色的变化从而直接影响产品的食用品质。

由表1可知, 与对照组相比金鲳鱼片经烹饪处理后的  $L^*$ 、 $b^*$ 、 $C^*$ 、 $H^*$  显著增加 ( $P < 0.05$ ), 而  $a^*$  显著降低 ( $P < 0.05$ ), 说明金鲳鱼片加热后颜色发生了变化, 这可能与鱼肉肌纤维的收缩、水分的流失和蛋白质变性有关<sup>[14]</sup>。在3种不同的烹饪方式下,  $L^*$  值的提升很可能是由于鱼片受热时球蛋白的结构发生变化,

表1 不同烹饪方式对金鲳鱼片色差的影响

Table 1 Effect of different cooking methods on the color difference of golden pomfret fillets

烹饪方式	色度指标				
	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$C^*$	$H^*$
CK	53.14±0.30 <sup>g</sup>	2.34±0.35 <sup>a</sup>	3.02±0.57 <sup>g</sup>	3.83±0.65 <sup>h</sup>	1.29±0.11 <sup>e</sup>
S2	75.03±0.70 <sup>c</sup>	1.23±0.03 <sup>c</sup>	9.17±1.53 <sup>ef</sup>	9.26±1.52 <sup>efg</sup>	7.44±1.28 <sup>d</sup>
S5	80.13±0.69 <sup>b</sup>	1.19±0.22 <sup>cd</sup>	10.76±1.37 <sup>de</sup>	11.34±2.15 <sup>cde</sup>	9.12±0.69 <sup>d</sup>
S8	71.98±2.00 <sup>d</sup>	0.71±0.07 <sup>ef</sup>	10.61±0.49 <sup>de</sup>	10.63±0.49 <sup>def</sup>	15.05±2.20 <sup>c</sup>
C2	74.94±1.46 <sup>c</sup>	0.30±0.08 <sup>g</sup>	8.05±1.00 <sup>f</sup>	8.05±1.00 <sup>fg</sup>	23.06±3.78 <sup>b</sup>
C5	85.39±1.07 <sup>a</sup>	0.48±0.07 <sup>fg</sup>	12.98±0.68 <sup>cd</sup>	12.54±0.49 <sup>cd</sup>	27.57±2.93 <sup>a</sup>
C8	79.83±2.27 <sup>b</sup>	0.31±0.04 <sup>g</sup>	7.56±0.31 <sup>f</sup>	7.57±0.31 <sup>f</sup>	24.55±2.36 <sup>ab</sup>
B2	77.51±0.42 <sup>bc</sup>	0.85±0.02 <sup>de</sup>	13.78±0.95 <sup>c</sup>	13.81±0.94 <sup>c</sup>	16.33±1.53 <sup>c</sup>
B5	66.03±0.84 <sup>e</sup>	1.61±0.11 <sup>b</sup>	23.08±1.59 <sup>b</sup>	23.14±1.59 <sup>b</sup>	14.40±1.59 <sup>c</sup>
B8	62.22±2.16 <sup>f</sup>	1.30±0.08 <sup>bc</sup>	26.31±0.30 <sup>a</sup>	26.33±0.31 <sup>a</sup>	22.45±1.50 <sup>b</sup>

注: 同一列不同小写字母表示具有显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 表2~表3同。

导致亚铁红素氧化状态被改变, 从而使得鱼片呈现出更为明亮和洁白的色泽。当亚铁肌红蛋白发生氧化转变为高铁肌红蛋白时,  $a^*$  值会出现明显的降低<sup>[15]</sup>, 水煮处理的  $a^*$  值最低为 0.30,  $L^*$  值最大为 85.39, 可能与肌肉组织中的水分含量高、不容易沉积色素有关。蒸制和水煮 5 min 的鱼肉比 8 min 的要亮白, 说明蒸煮时间过长会导致鱼肉氧化颜色暗淡。烤制处理的鱼片表面颜色为黄褐色, 烤制时间越长颜色越焦黄, 烤制 8 min 的  $b^*$  值达到最大为 26.31, 可能是因为高温有利于焦糖化或美拉德反应生成更多中间产物, 继续反应生成棕色及香味物质<sup>[16]</sup>。蒸制和水煮的色彩饱和度  $C^*$  无显著性差异 ( $P > 0.05$ )。鱼片  $H^*$  值越小表明肉色越鲜红, 水煮的鱼片红色褪去所以  $H^*$  最大, 其次是被烤到黄褐色的鱼片。整体来看烤制的金鲳鱼片的色彩强度和饱和度更好, 视觉效果颜色看起来更鲜艳。

### 2.3 不同烹饪方式对金鲳鱼片 pH 的影响

肉制品的 pH 对其新鲜度、口感和整体品质起着决定性作用, 也是评价肌肉品质优劣的重要理化指标之一<sup>[17]</sup>。鱼肉在烹饪过程中 pH 会发生一定改变反映肌肉生物化学变化, 经不同烹饪方式处理后的金鲳鱼片的 pH 如图2所示。

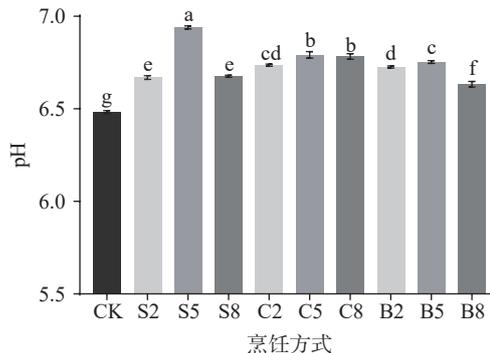


图2 不同烹饪方式对金鲳鱼片 pH 的影响

Fig.2 Effect of different cooking methods on the pH of golden pomfret fillets

新鲜金鲳鱼肉的 pH 为 6.48, 经烹饪处理的金鲳鱼肉的 pH 均有显著升高 ( $P < 0.05$ ), 可能是因为水分流失会导致鱼肉中相关物质的浓缩, 以及鱼肉中的蛋白质在受热后会发生变性, 这一过程中酸性基团的数量会逐渐减少<sup>[18]</sup>。蒸制的 pH 低于水煮组可能是因为蒸制处理时水蒸气促进了脂肪的氧化进程生成脂肪酸导致降低。烤制 8 min 鱼肉 pH 为 6.63 较蒸制和水煮低, 这与李锐等<sup>[19]</sup>的研究结果类似, 在高温条件下, 加热时间过长导致鱼肉中的碱性基团与某些氧化产物发生进一步反应使 pH 减少。整体来看, 随着加热时间变长, 各样品组的 pH 先因鱼肉蛋白变性而升高后又因鱼肉脂肪水解降低, 不同烹饪方式下鱼肉 pH 的差异可能也与脂肪水解程度不同相关<sup>[20]</sup>。

### 2.4 不同烹饪方式对金鲳鱼片基本营养成分的影响

鱼肉的营养构成主要涵盖水分、高质量的蛋白

质、健康的脂肪和多种矿物质, 这些基本成分不仅是鱼肉食用价值的关键所在, 同时也是评估其品质的重要参考标准。不同烹饪方式对金鲷鱼片基本营养成分包括水分、灰分、粗蛋白、粗脂肪的含量如表 2。

表 2 不同烹饪方式对金鲷鱼片基本营养成分的影响  
Table 2 Effect of different cooking methods on the basic nutritional components of golden pomfret fillets

烹饪方式	相对含量(g/100 g)			
	水分	灰分	粗蛋白	粗脂肪
CK	66.03±0.32 <sup>bc</sup>	1.22±0.02 <sup>d</sup>	19.13±0.77 <sup>f</sup>	10.18±0.14 <sup>a</sup>
S2	64.12±1.27 <sup>c</sup>	1.44±0.13 <sup>cd</sup>	21.50±1.28 <sup>e</sup>	8.56±2.60 <sup>cb</sup>
S5	63.25±1.07 <sup>c</sup>	1.26±0.06 <sup>d</sup>	24.00±0.98 <sup>cd</sup>	6.52±0.18 <sup>cd</sup>
S8	66.83±1.56 <sup>c</sup>	1.65±0.01 <sup>bc</sup>	23.91±0.23 <sup>cd</sup>	4.93±0.56 <sup>e</sup>
C2	69.88±0.42 <sup>a</sup>	1.64±0.31 <sup>bc</sup>	22.44±0.98 <sup>de</sup>	7.53±0.03 <sup>chd</sup>
C5	68.65±0.99 <sup>ab</sup>	1.20±0.01 <sup>d</sup>	23.18±0.88 <sup>de</sup>	6.27±0.20 <sup>edc</sup>
C8	70.56±0.68 <sup>a</sup>	1.14±0.19 <sup>cd</sup>	21.58±0.99 <sup>e</sup>	6.93±1.14 <sup>ode</sup>
B2	63.66±0.63 <sup>c</sup>	1.82±0.14 <sup>ab</sup>	25.38±1.00 <sup>e</sup>	8.00±0.37 <sup>cha</sup>
B5	53.45±1.51 <sup>d</sup>	1.89±0.02 <sup>ab</sup>	29.73±0.48 <sup>b</sup>	9.31±0.16 <sup>ba</sup>
B8	46.97±2.16 <sup>e</sup>	2.00±0.02 <sup>a</sup>	27.45±0.31 <sup>a</sup>	5.54±0.05 <sup>ed</sup>

新鲜金鲷鱼粗蛋白质量分数高达 19.13 g/100 g, 说明金鲷鱼是高蛋白鱼类。与新鲜金鲷鱼片相比, 经水煮 2 min、8 min 和烤制 5 min、8 min 处理后的水分含量均显著降低( $P<0.05$ ), 蒸制处理无显著性差异( $P>0.05$ ), 水分含量的降低可能是由于在加热过程中鱼肉的蛋白质变性, 蛋白质处于紧密状态, 则网络空间较小, 导致肌肉持水能力下降, 细胞内游离水溢出。鱼肉灰分含量一定程度上可以反映该鱼肉中矿物质和微量元素的含量, 新鲜金鲷鱼的灰分含量为 1.22 g/100 g, 相对于一般淡水鱼要高<sup>[21]</sup>, 不同加工方式处理组之间的灰分没有显著性差异( $P>0.05$ )。熟样品相对于生样品的粗蛋白含量都有增加, 可能是在烹饪的加热阶段, 水分由于受热而逐渐蒸发导致其相对含量增加, 3 种烹饪方式都在加热 5 min 时粗蛋白含量达到最高。加热处理样品中的脂肪含量都略有降低, 是由于脂肪的热反应形成了小分子物质, 脂肪溶解在游离水中并随之消失<sup>[22]</sup>, 因此蒸、煮处理的脂肪相对含量低。相较于蒸制和水煮, 烤制处理会导致更高的水分损失, 从而使得粗蛋白与粗脂肪的相对含量更为显著, 烤制 5 min 的鱼肉保留更多的粗脂肪和蛋白质, 烤制 8 min 的鱼肉脂肪含量最低可能是因为在长时间高温加热下油脂严重外溢所造成。整体来看, 蒸、煮的方式加工鱼肉更符合低脂人群的需求, 而烤制则更符合需要高蛋白的人群。

## 2.5 不同烹饪方式对金鲷鱼片质构特性的影响

质构特性在很大程度上决定鱼肉的食用品质, 经不同烹饪方式处理后金鲷鱼片质构指标数值如表 3 所示。与对照组相比金鲷鱼片经过烹饪后硬度、咀嚼性以及胶着性都有显著性差异( $P<0.05$ ), 而弹性和内聚性则无显著性差异( $P>0.05$ )。

硬度是决定鱼肉制品口感的主要因素, 新鲜金鲷鱼片的硬度为 723.89 g, 经烹饪处理后显著降低

表 3 不同烹饪方式对金鲷鱼片质构特性的影响

Table 3 Effect of different cooking methods on the texture characteristics of golden pomfret fillets

烹饪方式	质构指标				
	硬度(g)	弹性(mm)	咀嚼性(mJ)	内聚性	胶着性
CK	723.89±27.73 <sup>a</sup>	0.93±0.04 <sup>a</sup>	308.49±11.59 <sup>a</sup>	0.43±0.07 <sup>b</sup>	338.68±4.60 <sup>a</sup>
S2	230.52±13.80 <sup>c</sup>	0.89±0.04 <sup>abc</sup>	105.36±6.27 <sup>cd</sup>	0.64±0.03 <sup>a</sup>	155.53±0.95 <sup>b</sup>
S5	180.07±15.59 <sup>de</sup>	0.82±0.03 <sup>cd</sup>	92.81±5.37 <sup>de</sup>	0.67±0.02 <sup>a</sup>	136.31±8.28 <sup>e</sup>
S8	156.44±11.90 <sup>e</sup>	0.78±0.03 <sup>d</sup>	83.84±1.24 <sup>e</sup>	0.49±0.03 <sup>b</sup>	103.13±3.91 <sup>e</sup>
C2	186.94±8.19 <sup>d</sup>	0.93±0.04 <sup>a</sup>	105.61±9.76 <sup>c</sup>	0.63±0.05 <sup>a</sup>	101.92±1.33 <sup>e</sup>
C5	111.91±5.53 <sup>f</sup>	0.94±0.05 <sup>a</sup>	65.84±2.70 <sup>f</sup>	0.63±0.05 <sup>a</sup>	72.30±3.88 <sup>f</sup>
C8	129.26±4.85 <sup>f</sup>	0.83±0.05 <sup>bcd</sup>	46.55±4.17 <sup>g</sup>	0.51±0.05 <sup>b</sup>	55.34±1.35 <sup>g</sup>
B2	237.59±12.58 <sup>c</sup>	0.87±0.06 <sup>abc</sup>	85.31±1.38 <sup>e</sup>	0.47±0.08 <sup>b</sup>	106.49±2.54 <sup>e</sup>
B5	270.35±5.72 <sup>b</sup>	0.78±0.03 <sup>d</sup>	125.47±6.77 <sup>b</sup>	0.63±0.03 <sup>a</sup>	155.06±4.39 <sup>b</sup>
B8	297.50±21.60 <sup>b</sup>	0.92±0.06 <sup>ab</sup>	136.18±10.79 <sup>b</sup>	0.67±0.08 <sup>a</sup>	125.36±1.67 <sup>d</sup>

( $P<0.05$ ), 可能是维持蛋白质结构的化学键受热被破坏, 鱼肉的蛋白质变性, 降低了细胞间的结合力, 使鱼肉的硬度降低<sup>[23]</sup>。3 种处理方式加热 2 min 的鱼肉弹性和对照组没有显著性差异( $P>0.05$ ), 加热时间为 8 min 时, 蒸制和水煮的鱼肉弹性显著降低, 烤制的弹性变大。蒸制和水煮的咀嚼性对比对照组的 308.49 mJ 显著降低, 随着加热时间延长咀嚼性越低, 可能是因为以水作为介质持续加热下肌肉中的胶原蛋白将缔结组织转化为明胶, 使鱼软化。烤制的咀嚼性相对较高, 可能在高温环境下, 肌原纤维蛋白发生凝结和收缩的化学反应, 导致肌肉纤维间的连接更为紧密, 从而改变了肌肉的整体结构<sup>[24]</sup>。内聚性反映细胞间结合力的大小, 各处理组均比新鲜鱼片 0.43 的内聚性要略高, 说明随着温度的升高鱼肉中的水分和组织液流失, 使细胞间结合力上升、肉质变紧密; 各处理组的胶着性相对于新鲜鱼肉有显著降低, 其中水煮的胶着性最低, 脂肪的含量高低对鱼肉的胶着性具有一定影响<sup>[25]</sup>, 鱼肉的脂肪含量相对增加会导致整体的胶着性显著增加, 而表 2 各处理组的粗脂肪含量趋势与胶着性的趋势类似。整体来看, 烤制鱼片的质构特性各项指标数值相对较高, 说明能提供 richer 的口感。

## 2.6 不同烹饪方式对金鲷鱼片脂肪酸组成含量的影响

脂肪酸是脂肪的重要组成部分, 热处理必然导致鱼肉脂质的氧化, 其中不同的烹饪方式导致鱼肉脂肪酸有不同反应, 从而影响金鲷鱼片的食用品质和营养价值。由表 4 可知, 在新鲜金鲷鱼片中检测出 19 种脂肪酸包括 7 种饱和脂肪酸(SFA), 含量为 31.14%, 5 种单不饱和脂肪酸(MUFA), 含量为 36.33%, 7 种多不饱和脂肪酸(PUFA), 含量为 32.53%, 其中不饱和脂肪酸(UFA)占脂肪酸总量的 68.86%, 这一结果与杨欣怡等<sup>[26]</sup>对海水网箱养殖卵形鲳鲹肌肉共检测出 27 种脂肪酸包括 SFA (32.58%)、MUFA (34.70%)、PUFA (32.72%) 有差异, 可能和鱼自身的特性和养殖环境等因素存在一定的关联。不同烹饪方式处理后的金鲷鱼片脂肪酸

组成和含量发生变化,在蒸制、水煮、烤制的鱼肉中分别检测出 13、13、11 种脂肪酸,熟样品的 SFA 的含量与对照组均有显著性差异( $P<0.05$ ),饱和脂肪酸含量依次为蒸制>水煮>烤制>对照;蒸制和水煮的 MUFA 含量与生样品有显著差异( $P<0.05$ ),烤制组则没有显著性差异( $P>0.05$ ),单不饱和脂肪酸含量依次为蒸制>对照>烤制>水煮;PUFA 的含量与对照组均有显著性差异( $P<0.05$ ),多不饱和脂肪酸的含量依次为对照>烤制>水煮>蒸制。由此可以看出烹饪后 PUFA 的含量显著下降,而 SFA 的含量显著上升,说明加热处理会导致不饱和脂肪酸的氧化。

表 4 不同烹饪方式对金鲳鱼片脂肪酸组成和含量的影响  
Table 4 Effect of different cooking methods on the composition and content of fatty acids in golden pomfret fillets

脂肪酸简称	相对含量(%)			
	CK	S5	C5	B5
C14:0	1.26±0.01 <sup>a</sup>	1.26±0.01 <sup>a</sup>	1.33±0.03 <sup>a</sup>	1.31±0.03 <sup>a</sup>
C15:0	0.23±0.00 <sup>a</sup>	0.29±0.01 <sup>b</sup>	-	-
C16:0	23.14±0.04 <sup>b</sup>	24.46±0.01 <sup>a</sup>	24.52±0.12 <sup>a</sup>	24.45±0.08 <sup>a</sup>
C17:0	0.23±0.00 <sup>b</sup>	0.26±0.00 <sup>ab</sup>	0.27±0.01 <sup>a</sup>	-
C18:0	5.56±0.04 <sup>d</sup>	7.23±0.01 <sup>b</sup>	7.55±0.03 <sup>a</sup>	6.84±0.00 <sup>c</sup>
C20:0	0.36±0.00 <sup>a</sup>	0.33±0.00 <sup>b</sup>	-	-
C22:0	0.35±0.00	-	-	-
ΣSFA	31.14±0.09 <sup>c</sup>	33.83±0.02 <sup>a</sup>	33.68±0.13 <sup>a</sup>	32.60±0.10 <sup>b</sup>
C16:1n-7	2.47±0.01 <sup>ab</sup>	2.44±0.00 <sup>b</sup>	2.29±0.01 <sup>c</sup>	2.47±0.00 <sup>a</sup>
C17:1	0.20±0.03	-	-	-
C18:1n-9c	31.39±0.01 <sup>d</sup>	33.65±0.01 <sup>a</sup>	31.99±0.06 <sup>c</sup>	32.12±0.03 <sup>b</sup>
C20:1	1.74±0.34 <sup>a</sup>	1.71±0.00 <sup>a</sup>	1.67±0.02 <sup>a</sup>	1.71±0.03 <sup>a</sup>
C22:1n-9	0.54±0.01	-	-	-
ΣMUFA	36.33±0.05 <sup>b</sup>	37.80±0.02 <sup>a</sup>	35.95±0.09 <sup>c</sup>	36.30±0.09 <sup>b</sup>
C18:2n-6t	0.14±0.02 <sup>d</sup>	22.35±0.01 <sup>c</sup>	23.15±0.02 <sup>b</sup>	24.07±0.02 <sup>a</sup>
C18:2n-6c	25.23±0.06	-	-	-
C18:3n-3	2.29±0.03 <sup>a</sup>	2.06±0.02 <sup>b</sup>	2.23±0.02 <sup>a</sup>	2.38±0.05 <sup>a</sup>
C20:2	1.83±0.00 <sup>a</sup>	1.50±0.04 <sup>b</sup>	1.63±0.04 <sup>b</sup>	1.83±0.07 <sup>a</sup>
C20:3n-3	0.42±0.02	-	-	-
C20:4n-6	0.33±0.03 <sup>a</sup>	-	-	0.54±0.08 <sup>a</sup>
C22:6n-3	2.28±0.08 <sup>a</sup>	2.46±0.08 <sup>a</sup>	3.37±0.03 <sup>b</sup>	2.29±0.39 <sup>a</sup>
ΣPUFA	32.53±0.17 <sup>a</sup>	28.37±0.00 <sup>d</sup>	30.37±0.09 <sup>c</sup>	31.10±0.23 <sup>b</sup>
Σn-6 PUFA	25.79±0.12 <sup>a</sup>	22.35±0.02 <sup>d</sup>	23.15±0.03 <sup>c</sup>	24.61±0.15 <sup>b</sup>
Σn-3 PUFA	4.90±0.04 <sup>b</sup>	4.52±0.03 <sup>b</sup>	5.6±0.01 <sup>a</sup>	4.66±0.47 <sup>b</sup>
n-6/n-3	5.26	4.94	4.13	5.28
SFA:MUFA: PUFA	1.04:1.21: 1.08	1.13:1.26: 0.95	1.12:1.20: 1.01	1.08:1.21: 1.04

注:“-”表示未检出;同一行不同小写字母表示具有显著性差异( $P<0.05$ ),表5同。

鱼肉中的不饱和脂肪酸对人体有益,多不饱和脂肪酸中的 n-3 和 n-6 脂肪酸不能在人体合成,必须从饮食中获得,而且是作为类二十烷酸化合物合成的基础原料,其体内含量的平衡对于保障人体全面健康状态具有不容忽视的显著影响<sup>[27]</sup>。n-6/n-3 脂肪酸的比值对平衡饮食和营养配置具有重要意义,饮食中过量的 n-6/n-3 PUFA 比值会导致心血管疾病、癌症和自身免疫性疾病的恶化<sup>[28]</sup>。FAO/WHO 建议,为了维持人体健康,膳食脂肪酸的理想比例应为 SFA:

MUFA:PUFA 约为 1:1:1,同时 n-6 与 n-3 脂肪酸的比例应保持在 5~10 的范围内<sup>[23]</sup>,本实验中经不同烹饪方式处理后 SFA:MUFA:PUFA 比例分别为 1.04:1.21:1.08、1.13:1.26:0.95、1.12:1.20:1.01、1.08:1.21:1.04; n-6:n-3 比例分别为 5.26、4.94、4.13、5.28。由此可见蒸制对鱼肉脂肪酸的比例影响最大,不饱和脂肪酸损失最多,水煮对鱼肉脂肪酸的比例影响小,但 n-6:n-3 比例最低,因此烤制处理的鱼片的脂肪酸比例更符合 FAO/WHO 推荐的健康要求,其多不饱和脂肪酸含量较高,可提高产品的营养价值,且脂肪酸作为挥发性化合物的前体物质和脂质的组成成分,烤制更有利于风味的形成。

## 2.7 不同烹饪方式对金鲳鱼片游离氨基酸组成的影响

氨基酸是构成蛋白质的基本结构单位,食品中蛋白质的必需氨基酸和非必需氨基酸含量决定其营养价值高低。必需氨基酸、呈味氨基酸的种类和数量更是和鱼肉蛋白质营养价值的高低以及其独特风味息息相关。金鲳鱼经不同烹饪方式处理后氨基酸含量的变化如表 5 所示。

表 5 不同烹饪方式对金鲳鱼片游离氨基酸含量的影响  
Table 5 Effect of different cooking methods on the content of free amino acids in golden pomfret fillets

味感	氨基酸	含量(mg/100 g)			
		CK	S5	C5	B5
苦	赖氨酸(Lys)	11.40±0.07 <sup>a</sup>	5.43±0.03 <sup>b</sup>	3.79±0.00 <sup>c</sup>	5.74±0.1 <sup>d</sup>
苦	异亮氨酸(Ile)	2.98±0.02 <sup>a</sup>	2.84±0.02 <sup>a</sup>	3.22±0.77 <sup>a</sup>	3.8±0.93 <sup>a</sup>
苦	亮氨酸(Leu)	4.51±0.00 <sup>a</sup>	4.25±0.03 <sup>a</sup>	4.27±1.09 <sup>a</sup>	5.17±1.12 <sup>a</sup>
甜	苏氨酸(Thr)	4.31±0.02 <sup>a</sup>	3.88±0.02 <sup>b</sup>	3.33±0.05 <sup>c</sup>	4.17±0.12 <sup>a</sup>
苦	苯丙氨酸(Phe)	2.11±0.03 <sup>a</sup>	2.04±0.01 <sup>a</sup>	1.72±0.06 <sup>b</sup>	2.22±0.2 <sup>a</sup>
苦	缬氨酸(Val)	3.86±0.00 <sup>b</sup>	3.65±0.02 <sup>b</sup>	6.33±0.23 <sup>a</sup>	6.42±1.39 <sup>a</sup>
苦	蛋氨酸(Met)	1.96±0.02 <sup>a</sup>	2.09±0.03 <sup>a</sup>	3.68±0.19 <sup>a</sup>	3.26±0.07 <sup>a</sup>
	ΣEAA	31.12±0.03 <sup>a</sup>	24.19±0.15 <sup>b</sup>	26.34±4.27 <sup>a</sup>	30.78±6.92 <sup>a</sup>
甜	甘氨酸(Gly)	99.31±0.36 <sup>c</sup>	99.35±0.43 <sup>c</sup>	102.28±0.65 <sup>b</sup>	136.4±1.58 <sup>a</sup>
甜	丙氨酸(Ala)	17.91±0.05 <sup>a</sup>	15.22±0.09 <sup>c</sup>	13.42±0.07 <sup>d</sup>	17.37±0.25 <sup>b</sup>
甜	脯氨酸(Pro)	0.84±0.01 <sup>b</sup>	0.84±0.03 <sup>b</sup>	1.66±0.27 <sup>a</sup>	1.85±0.32 <sup>a</sup>
苦	酪氨酸(Tyr)	1.66±0.02 <sup>a</sup>	1.58±0.02 <sup>a</sup>	1.67±0.67 <sup>a</sup>	1.8±0.54 <sup>a</sup>
甜	丝氨酸(Ser)	3.79±0.00 <sup>b</sup>	3.48±0.02 <sup>c</sup>	3.09±0.05 <sup>d</sup>	4.3±0.09 <sup>a</sup>
苦	半胱氨酸(Cys)	1.50±0.03 <sup>a</sup>	1.45±0.00 <sup>a</sup>	3.88±0.05 <sup>a</sup>	3.69±0.60 <sup>a</sup>
鲜	天冬氨酸(Asp)	1.14±0.02 <sup>a</sup>	0.96±0.00 <sup>b</sup>	0.28±0.03 <sup>c</sup>	0.32±0.02 <sup>c</sup>
鲜	谷氨酸(Glu)	9.94±0.02 <sup>a</sup>	5.99±0.03 <sup>b</sup>	3.89±0.01 <sup>c</sup>	5.00±0.05 <sup>d</sup>
苦	组氨酸(His)	1.35±0.01 <sup>b</sup>	1.30±0.02 <sup>b</sup>	1.05±0.01 <sup>c</sup>	1.46±0.04 <sup>a</sup>
苦	精氨酸(Arg)	0.89±0.02 <sup>a</sup>	1.01±0.02 <sup>a</sup>	0.64±0.12 <sup>b</sup>	0.81±0.05 <sup>ab</sup>
	ΣNEAA	138.31±0.41 <sup>b</sup>	131.17±0.58 <sup>b</sup>	131.85±4.39 <sup>b</sup>	173.00±6.55 <sup>a</sup>
	ΣTAA	169.44±0.44 <sup>b</sup>	155.36±0.73 <sup>b</sup>	158.20±8.66 <sup>b</sup>	203.78±13.47 <sup>a</sup>
	ΣSAA	126.15±0.43 <sup>b</sup>	122.77±0.51 <sup>a</sup>	123.77±0.55 <sup>a</sup>	164.09±2.37 <sup>a</sup>
	ΣUAA	11.07±0.04 <sup>b</sup>	6.94±0.03 <sup>b</sup>	4.17±0.04 <sup>b</sup>	5.32±0.07 <sup>b</sup>
	ΣBAA	31.84±0.03 <sup>a</sup>	25.16±0.19 <sup>b</sup>	26.66±5.05 <sup>c</sup>	31.00±7.45 <sup>d</sup>

注:ΣEAA代表必需氨基酸总量;ΣNEAA代表非必需氨基酸总量;ΣTAA代表游离氨基酸总量;ΣSAA代表甜味氨基酸总量;ΣUAA表示鲜味氨基酸总量;ΣBAA表示苦味氨基酸总量。

在新鲜金鲳鱼肉中检测出 17 种氨基酸,包括 10 种非必需氨基酸,7 种必需氨基酸,且不同氨基酸含量差异较大,其中甘氨酸含量最高,其次是丙氨

酸、赖氨酸、谷氨酸等, 脯氨酸含量最低。与对照组相比, 经过蒸制、水煮处理的 TAA 降低为 155.36 mg/100 g、158.20 mg/100 g, 烤制的 TAA 则是显著增高至 203.78 mg/100 g ( $P < 0.05$ ), 可能是由于蒸制和水煮过程中鱼肉内部汁液流失, 溶解于其中的游离氨基酸也随之损失导致 TAA 降低, 在高温下烤制鱼肉的蛋白质受热分解释放出大量的游离氨基酸, 同时鱼肉内部水分也被大量蒸发, 高温带来氨基酸的损失要少于氨基酸的富集, 从而使得游离氨基酸的含量显著增大<sup>[29]</sup>。

根据其味道特征, 金鲷鱼肉的氨基酸大致分为鲜味、甜味和苦味三类, 其中甜味和苦味氨基酸总含量明显高于鲜味氨基酸, 这与彭海川等<sup>[7]</sup>对新鲜鲟鱼肉测定的呈味氨基酸结果类似。甘氨酸是主要的甜味氨基酸, 烤制和水煮的甘氨酸含量高达 136.4 mg/100 g、102.28 mg/100 g, 甘氨酸不仅能够为鱼肉增添一种令人愉悦的甜味, 还有效地缓解和降低了鱼肉中苦涩的口感。苦味氨基酸以赖氨酸为主, 经烹饪后苦味氨基酸总含量都有所下降, 但在鱼肉中仍占一定比例, 这并不影响鱼肉风味, 因其与甜、鲜味氨基酸结合能增加鱼肉味道的丰富度, 改善口感, 蒸制的苦味氨基酸含量最低为 25.16 mg/100 g。在鱼肉中谷氨酸是构成鲜味的关键氨基酸, 生样的鲜味氨基酸总量要高于熟样, 其中蒸制能最大程度保留鱼肉的鲜味。鲜味氨基酸的含量较低, 但它能平衡酸、甜、苦、咸四种味道, 增强食物的总体口感<sup>[30]</sup>。

3 种不同的烹饪方式中烤制组的 EAA 最高, 相比于比生品, SAA 更是有极大程度的提高, 并且 BAA 最低, 说明烤制处理不仅能更好地保留金鲷

肉蛋白质的营养价值, 而且可以贡献丰富的滋味, 适量食用能满足人体对蛋白质的需求, 增强人体的免疫功能, 还可以刺激食欲, 起到开胃的作用。

### 2.8 不同烹饪方式对金鲷鱼片挥发性风味物质成分的影响

由表 6 可知, 新鲜金鲷鱼肉及 3 种烹饪方式处理后的鱼肉中, 共发现 64 种匹配度超过 80% 的挥发性风味成分。这些成分包括 11 种醛类、2 种酮类、1 种醇类、26 种芳香类、3 种酯类、18 种烃类以及 3 种其他挥发性成分。生金鲷鱼肉样品中鉴定出 35 种挥发性风味物质, 各样品组分别检测出 36、40、32 种挥发性物质, 其中有 16 种共有挥发性成分。不同的烹饪处理方式下, 金鲷鱼鱼肉挥发性风味物质的含量和数量差异较大。

醛类化合物主要源于脂肪酸在酶催化下的氧化裂解过程, 是肉制品的主要风味贡献物<sup>[31]</sup>, 主要呈现出青草香、花果香和鱼腥味等味道。由表 6 可以看出, 金鲷鱼的醛类物质含量为蒸制(1953.10 μg/kg) > 烤制(1648.08 μg/kg) > 水煮(1420.80 μg/kg) > 对照(272.95 μg/kg), 新鲜鱼肉中的醛类化合物主要是己醛、壬醛、辛醛三种, 鱼肉经过烹饪处理后, 醛类物质的种类和含量的增加, 说明了在加热过程中鱼肉的油酸或亚油酸发生了氧化<sup>[32]</sup>。对照组、蒸制、水煮、烤制鱼肉中醛类化合物中以己醛的浓度最高, 分别为 1482.47、1134.38、1357.01 μg/kg。饱和直链醛如己醛、庚醛这两种醛类物质主要呈现青草味、鱼腥味以及辛辣等不愉快的刺激气味, 而辛醛主要呈青草味和油脂味以及特有的辛辣风味, 壬醛则呈现强烈的焦香味和柑橘香以及鱼腥味<sup>[33]</sup>, 对于鱼肉风味物质的贡献

表 6 不同烹饪方式对金鲷鱼片挥发性成分及其绝对含量的影响

Table 6 Effect of different cooking methods on the volatile components and absolute content of golden pomfret fillets

序号	类别	CAS号	化合物名称	绝对含量(μg/kg)			
				CK	S5	C5	B5
1	醇类	000122-31-6	二乙醇	-	10.74	7.48	-
			合计	0	10.74	7.48	0
2		018829-55-5	(E)-2-庚醛	-	-	-	14.38
3		057266-86-1	(Z)-2-庚醛	-	22.99	17.22	-
4		002548-87-0	(E)-2-辛烯醛	-	43.27	-	-
5		1000376-70-0	十七碳醛	-	-	-	0.004
6	醛类	000111-71-7	庚醛	-	106.40	61.27	0.041
7		000066-25-1	己醛	211.29	1482.47	1134.38	1357.01
8		000124-19-6	壬醛*	50.95	117.82	98.10	66.10
9		000638-66-4	十八烷醛	-	-	3.59	-
10		000124-13-0	辛醛*	10.70	90.55	64.36	45.96
11		000110-62-3	戊醛	-	89.61	41.88	115.43
12		000124-25-4	肉豆蔻醛	-	-	-	3.79
				合计	272.95	1953.10	1420.80
13	酯类	000084-69-5	邻苯二甲酸二异丁酯	-	-	3.06	-
14		000084-78-6	邻苯二甲酸正丁酯	-	-	6.79	-
15		000686-07-7	二乙基二硫代氨基甲酸甲酯	2.29	-	-	-
			合计	2.29	0	9.86	0

续表 6

序号	类别	CAS号	化合物名称	绝对含量(μg/kg)			
				CK	S5	C5	B5
16		002234-20-0	2,4-二甲基苯乙烯	2.03	-	-	-
17		000488-23-3	1,2,3,4-四甲基苯	5.57	11.83	4.45	-
18		000526-73-8	1,2,3-三甲基苯*	21.22	43.35	13.19	9.41
19		000095-93-2	1,2,4,5-四甲基苯*	2.65	7.48	7.40	6.00
20		000095-63-6	1,2,4-三甲基苯	7.44	-	-	-
21		000135-01-3	1,2-二乙基苯	-	-	5.41	-
22		000108-38-3	1,3-二甲基苯	-	-	-	12.85
23		000105-05-5	1,4-二乙基苯	-	7.47	-	-
24		003454-07-7	对乙基苯乙烯	-	-	11.80	-
25		000933-98-2	1-乙基-2,3-二甲基苯	8.76	24.66	-	14.18
26		000611-14-3	1-乙基-2-甲基苯*	12.93	41.30	12.70	12.98
27		000934-74-7	5-乙基-3,5-二甲基苯	5.83	-	-	-
28	芳香类	000620-14-4	1-乙基-3-甲基苯	7.63	-	19.01	18.79
29		002039-89-6	2-乙基-1,4-二甲基苯	-	21.28	-	-
30		001758-88-9	2-乙基对二甲苯	3.59	-	-	-
31		000300-57-2	苯丙烯	-	-	7.06	-
32		000934-80-5	4-乙基-1,2-二甲基苯	-	11.58	-	-
33		000100-41-4	乙苯	5.06	-	-	-
34		000108-67-8	均三甲苯	-	14.98	31.69	27.18
35		000091-20-3	萘	-	31.33	28.52	45.72
36		000527-84-4	邻-异丙基苯*	3.22	3.27	9.81	15.22
37		000095-47-6	邻二甲苯	10.79	-	-	-
38	000099-87-6	对异丙基甲苯	-	-	27.27	-	
39	000106-42-3	对二甲苯	16.05	-	67.40	56.72	
40	000108-88-3	甲苯*	21.41	20.07	73.12	86.06	
41	000128-37-0	2,6-二叔丁基对甲酚*	429.86	317.75	338.69	361.11	
		合计	564.04	556.35	657.52	666.33	
42		041446-67-7	(Z)-3-十四碳烯	-	-	-	-
43		000275-51-4	甘菊蓝	33.85	0.74	-	-
44		000087-44-5	石竹烯*	2.76	-	3.28	2.29
45		000124-18-5	癸烷	-	3.37	7.36	7.81
46		005989-27-5	D-柠檬烯*	9.34	-	39.43	25.49
47		000112-40-3	十二烷*	9.99	33.28	39.38	37.91
48		000112-95-8	二十烷	-	44.57	3.32	4.17
49		000629-78-7	十七烷	4.34	-	-	-
50	烃类	000544-76-3	十六烷*	1.80	-	3.29	3.74
51		000638-36-8	2,6,10,14-四甲基十六烷	-	3.05	5.14	-
52		000496-11-7	1H-萘	2.39	7.12	-	-
53		000629-92-5	十九烷	1.11	11.02	9.41	-
54		000629-62-9	十五烷*	3.26	9.82	5.82	6.02
55		001921-70-6	2,6,10,14-四甲基十五烷	-	6.24	-	7.07
56		000629-59-4	十四烷*	7.07	-	14.01	11.60
57		000629-50-5	十三烷*	8.47	15.02	25.86	20.87
58		001120-21-4	十一烷	-	29.69	-	19.39
59		001002-43-3	3-甲基十一烷	-	-	13.76	-
		合计	84.39	163.92	170.06	146.36	
60	酮类	003214-41-3	2,5-辛烷二酮	-	-	71.09	-
61		000110-13-4	2,5-己二酮	-	79.17	-	-
		合计		79.17	71.09		
62	其他	073105-67-6	1-碘-2-甲基十一烷	-	4.02	-	-
63		003777-69-3	2-戊基呋喃	-	18.10	16.04	-
64		1000222-86-6	甲氧基苯基-肟*	0.02	18.98	163.44	210.61
		合计	0.02	41.10	179.48	210.61	

注：“-”表示未检出成分；“\*”表示各组共有的成分。

大。从含量占比推测,己醛、壬醛、辛醛和庚醛为金鲳鱼腥味物质的主要贡献者,蒸制鱼肉中醛类物质含量最高,所以其腥味较重。鱼肉酮类化合物的阈值高于醛类物质,多由加热过程中不饱和脂肪酸的氧化或氨基酸降解产生,主要表现为清香和花果香味<sup>[34]</sup>。在蒸制、水煮处理中的金鲳鱼肉中分别检测出 2,5-己二酮(79.17  $\mu\text{g}/\text{kg}$ )、2,5-辛烷二酮(71.09  $\mu\text{g}/\text{kg}$ )两种带有香味的物质可能对金鲳鱼肉的特征风味有贡献。鱼肉中的饱和醇类和烃类化合物具有相对较高的阈值,在鱼肉的整體风味中所起的作用相对较小,本实验中水煮组检测出的醇类、烃类含量相对较多,分别为 7.48、170.06  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。酯类物质具有愉快水果香味或轻微的油脂味,仅在对照组和水煮组检测出少量分别为 2.29、9.86  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,可能是金鲳鱼酯类含量偏低以及烹饪过程中造成损耗。芳香类物质由于阈值较高,对风味贡献较低,其中检测出 2,6-二叔丁基对甲酚,是一种食品专用的抗氧化剂,可能是由鱼饲料喂养或者养殖环境中被鱼摄入体内,新鲜鱼肉中含量为 429.86  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,经蒸制、水煮、烤制处理后含量降低了 26.08%、21.21%、15.99%。其他化合物中,2-戊基-呋喃因其较低的阈值而表现出明显的特征,散发出刺鼻的炒花香、脂肪香气,并带有一种非典型的鱼腥味<sup>[35]</sup>,甲氧基-苯基-肟有鱼肉香味、烤肉香气、焦香味和坚果香气<sup>[36]</sup>,而上述香味成分的协同作用也形成了金鲳鱼肉的独特味道。

### 3 结论

本研究分析了蒸制、水煮、烤制 3 种烹饪方式对金鲳鱼片热加工损失率、色泽、pH、基本营养成分、质构特性、脂肪酸、游离氨基酸、风味物质等的影响,结果显示,新鲜金鲳鱼肉经过烹饪后其相关理化指标都发生明显变化。加热时间的长短也对鱼肉产生一定影响,加热时间为 5 min 的鱼肉粗蛋白含量最高。整体来看,蒸制的热加工损失率低,鱼肉比较完整,SFA(33.83%)、MUFA(37.80%)、UAA(6.94 mg/100 g)含量和 pH 较高,能最大程度保留鱼肉的鲜味。水煮的鱼片色泽白亮,水分含量高,硬度小,口感柔软,而粗脂肪含量较低能满足减肥人群的需求。烤制的鱼片色彩鲜艳,硬度、弹性、咀嚼性、内聚性、胶着性相对较大,食用口感好,n-6/n-3 以及膳食脂肪酸比例符合 FAO/WHO 健康标准,其次 EAA、SAA 含量高达 30.78、164.09 mg/100 g, BAA 低至 31.00 mg/100 g,既保留营养价值又提供丰富的口感。挥发性风味物质结果显示 3 种烹饪方式检测出 36、40、32 种挥发性物质,烹饪后的鱼肉醛类化合物含量显著上升,并且能够产生一些新的风味物质。本研究结果有助于消费者依据个人偏好及营养需求选择适宜的金鲳鱼肉加工方式。另外,也有助于食品加工行业优化金鲳鱼的生产工艺,减少有害物质的产生,提高产品的安全性和品质。

© The Author(s) 2025. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

### 参考文献

- [1] LI Z, JINKWON S Y, RUIBAEK H. Characterization and evaluation of changes in the aroma-active components in szechuan pepper (*Zanthoxylum bungeanum* Maxim) under different cooking temperatures using gas chromatography-olfactometry[J]. *Chemosensory Perception*, 2019, 12(1): 32–39.
- [2] 张进伟,胡晓,陈胜军,等. 腌制风干过程中卵形鲳鲹肉质、蛋白质氧化及游离氨基酸的变化[J]. *食品科学*, 2022, 43(18): 272–278. [ZHANG Jinwei, HU Xiao, CHEN Shengjun, et al. Changes in the properties, protein oxidation, and free amino acids of oval pomfret and catfish meat during the pickling and air drying process[J]. *Food Science*, 2022, 43(18): 272–278.]
- [3] 于淑池,谢家淑. 复合抗冻剂的配方优化及对卵形鲳鲹冻藏品质的影响[J]. *食品科技*, 2020, 45(7): 267–274. [YU Shuchi, XIE Jiashu. Optimization of the formula of composite antifreeze and its effect on the frozen storage quality of oval pomfret[J]. *Food Technology*, 2020, 45(7): 267–274.]
- [4] WANG H F, WU Y Y, XIANG H, et al. UHPLC-Q-Exactive Orbitrap MS/MS-based untargeted lipidomics reveals molecular mechanisms and metabolic pathways of lipid changes during golden pomfret (*Trachinotus ovatus*) fermentation[J]. *Food Chem*, 2022, 396: 133676.
- [5] LI C, WANG D Y, XU W M, et al. Effect of final cooked temperature on tenderness, protein solubility and microstructure of duck breast muscle[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2013, 51(1): 266–274.
- [6] 胡吕霖,任思婕,沈清,等. 不同烹饪方式及体外模拟消化环境对鲟鱼蛋白质氧化及消化性的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(20): 63–70. [HU Lulin, REN Sijie, SHEN Qing, et al. The effects of different cooking methods and *in vitro* simulated digestion environments on protein oxidation and digestibility in sturgeon[J]. *Food Science*, 2018, 39(20): 63–70.]
- [7] 彭海川,钱琴,母运龙,等. 不同烹饪方式处理的鲟鱼肉营养成分和风味比较[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(2): 236–244. [PENG Haichuan, QIAN Qin, MU Yunlong, et al. Comparison of nutrients and flavors of sturgeon meat processed with different cooking methods[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2022, 38(2): 236–244.]
- [8] CHEN J H, TAO L N, ZHANG T, et al. Effect of four types of thermal processing methods on the aroma profiles of acidity regulator-treated tilapia muscles using E-nose, HS-SPME-GC-MS and HS-GC-IMS[J]. *LWT-Food Science & Technology*, 2021, 147: 11585.
- [9] DONG X P, LI D Y, HUANG Y, et al. Nutritional value and flavor of turbot (*Scophthalmus maximus*) muscle as affected by cooking methods[J]. *International Journal of Food Properties*, 2018, 21(1): 1972–1985.
- [10] 熊添,吴燕燕,陈胜军,等. 不同热加工方式对卵形鲳鲹肌肉蛋白及品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(12): 179–185. [XIONG Tian, WU Yanyan, CHEN Shengjun, et al. The effect of different heat processing methods on the muscle protein and quality of the oval pomfret[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2020, 46(12): 179–185.]
- [11] 侯雨雪,林伟玲,刘学铭,等. 桑椹多酚对广式腊肠贮藏过程中脂质降解和氧化特性的调控作用[J]. *现代食品科技*, 2023,

- 39(6): 162–170. [ HOU Yuxue, LIN Weiling, LIU Xueming, et al. The regulatory effect of mulberry polyphenols on lipid degradation and the regulatory effect of mulberry polyphenols on lipid degradation[J]. *Modern Food Science & Technology*, 2023, 39(6): 162–170. ]
- [ 12 ] 鞠健, 乔宇, 汪超, 等. 不同温度对白鲢鱼肉在蒸煮过程中品质的影响[J]. *食品工业科技*, 2016, 37(24): 121–127. [ JU Jian, Qiao Yu, WANG Chao, et al. The effect of different temperatures on the quality of silver carp meat during cooking[J]. *Food Industry Technology*, 2016, 37(24): 121–127. ]
- [ 13 ] 赵洪雷, 冯媛, 徐永霞, 等. 海鲈鱼肉蒸制过程中品质及风味特性的变化[J]. *食品科学*, 2021, 42(20): 145–151. [ ZHAO Honglei, FENG Yuan, XU Yongxia, et al. Changes in quality and flavor characteristics of sea bass meat during steaming process[J]. *Food Science*, 2021, 42(20): 145–151. ]
- [ 14 ] 吴琼, 李德阳, 潘锦锋, 等. 熟化方式对大菱鲆肌肉加工特性的影响[J]. *中国食品学报*, 2016, 16(9): 129–135. [ WU Qiong, LI Deyang, PAN Jinfeng, et al. The effect of maturation methods on the processing characteristics of turbot muscle[J]. *Chinese Journal of Food Science*, 2016, 16(9): 129–135. ]
- [ 15 ] FLETCHER D L, QIAO M, SMITH D P. The relationship of raw broiler breast meat color and pH to cooked meat color and pH[J]. *Poult Sci*, 2000, 79(5): 784–788.
- [ 16 ] AKTAĞ I G, GÖKMEN V. Investigations on the formation of  $\alpha$ -dicarbonyl compounds and 5-hydroxymethylfurfural in fruit products during storage: New insights into the role of Maillard reaction[J]. *Food Chem*, 2021, 363: 130280.
- [ 17 ] 郑皎皎. 鲤鱼肌肉热加工过程中品质变化的研究[D]. 大连: 大连工业大学, 2016. [ ZHENG Jiaojiao. A study on the quality changes of carp muscle during thermal processing[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. ]
- [ 18 ] 姜启兴. 鳙鱼肉热加工特性及其机理研究[D]. 无锡: 江南大学, 2015. [ JIANG Qixing. Research on the Hot processing characteristics and mechanism of bighead carp meat[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2015. ]
- [ 19 ] 李锐, 孙祖莉, 李来好, 等. 不同热加工方式对罗非鱼片食用品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2020, 46(14): 127–135. [ LI Rui, SUN Zuli, LI Laihao, et al. Effects of different thermal processing methods on edible quality of tilapia fillets[J]. *Food and Fermentation Industry*, 2020, 46(14): 127–135. ]
- [ 20 ] JOSEPH J K, AWOSANYA B, ADENIRAN A T, et al. The effects of end-point internal cooking temperatures on the meat quality attributes of selected Nigerian poultry meats[J]. *Food Quality and Preference*, 1997, 8(1): 57–61.
- [ 21 ] 杨华, 张建斌, 吴晓, 等. 冰温贮藏对鲢、草、鲤鱼糜制品品质的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(12): 273–278. [ YANG Hua, ZHANG Jianbin, WU Xiao, et al. The effect of ice temperature storage on the quality of silver carp, grass, and carp mince products[J]. *Food Science*, 2016, 37(12): 273–278. ]
- [ 22 ] XIONG T, MEI X, WU Y Y, et al. Insights into nutrition, flavor and edible quality changes of golden pomfret (*Trachinotus ovatus*) fillets prepared by different cooking methods[J]. *Front Nutr*, 2023, 10: 1227928.
- [ 23 ] 陈丽丽, 张树峰, 袁美兰, 等. 不同烹饪方式对脆肉鲩鱼肉营养品质的影响[J]. *中国调味品*, 2019, 44(10): 40–45. [ CHEN Lili, ZHANG Shufeng, YUAN Meilan, et al. The effect of different cooking methods on the nutritional quality of crispy grass carp meat[J]. *China Condiment*, 2019, 44(10): 40–45. ]
- [ 24 ] 夏超, 于小番, 崔丹丹, 等. 不同烹饪方式对黄颡鱼肉质特性的影响[J]. *中国调味品*, 2020, 45(7): 96–100, 107. [ XIA Chao, YU Xiaofan, CUI Dandan, et al. The effect of different cooking methods on the quality characteristics of yellow catfish meat[J]. *China Condiment*, 2020, 45(7): 96–100, 107. ]
- [ 25 ] FOX J B, ACKERMAN S A, JENKINS R K. Effect of anionic gums on the texture of pickled frankfurters[J]. *Journal of Food Science*, 1983, 48(4): 1031–1035.
- [ 26 ] 杨欣怡, 张凤桦, 赵鑫, 等. 网箱海养卵形鲳鲹饲料与肌肉品质评价[J]. *食品科学*, 2015, 36(21): 243–248. [ YANG Xinyi, ZHANG Fengping, ZHAO Xin, et al. Evaluation of feed and muscle quality for net cage sea raised oval pomfret and catfish[J]. *Food Science*, 2015, 36(21): 243–248. ]
- [ 27 ] 孙翔宇, 高贵田, 段爱莉, 等. 多不饱和脂肪酸的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2012, 33(7): 418–423. [ SUN Xiangyu, GAO Guitian, DUAN Aili, et al. Research progress on polyunsaturated fatty acids[J]. *Food Industry Technology*, 2012, 33(7): 418–423. ]
- [ 28 ] SIMOPOULOS A P. The importance of the ratio of omega-6/omega-3 essential fatty acids[J]. *Biomed Pharmacother*, 2002, 56(8): 365–379.
- [ 29 ] 吴晓龙, 涂宗财, 胡月明, 等. 不同高温处理方式对草鱼肉理化性质及滋味品质的影响[J/OL]. *食品工业科技*: 1–15 [2024-08-13]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023110193. [ WU Xiaolong, TU Zongcai, HU Yueming, et al. The effect of different high-temperature treatment methods on the physicochemical properties and taste quality of grass carp meat[J]. *Food Industry Technology*: 1–15 [2024-08-13]. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2023110193. ]
- [ 30 ] ZHAO C J, SCHIEBER A, GÄNZLE M G. Formation of taste-active amino acids, amino acid derivatives and peptides in food fermentations—A review[J]. *Food Research International*, 2016, 89 (Pt 1): 39–47.
- [ 31 ] TREVISAN A J, DE ALMEIDA LIMA D, SAMPAIO G R, et al. Influence of home cooking conditions on Maillard reaction products in beef[J]. *Food Chem*, 2016, 196: 161–169.
- [ 32 ] LIU L, ZHAO Y H, LU S X, et al. Metabolomics investigation on the volatile and non-volatile composition in enzymatic hydrolysates of Pacific oyster (*Crassostrea gigas*) [J]. *Food Chem: X*, 2023, 17: 100569.
- [ 33 ] AN Y, QIAN Y L, MAGANA A, et al. Comparative characterization of aroma compounds in silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*), pacific whiting (*Merluccius productus*), and Alaska Pollock (*Theragra chalcogramma*) surimi by aroma extract dilution analysis, odor activity value, and aroma recombination studies[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(38): 10403–10413.
- [ 34 ] DENG S Y, LIU Y H, HUANG F, et al. Evaluation of volatile flavor compounds in bacon made by different pig breeds during storage time[J]. *Food Chemistry*, 2021, 357: 129765.
- [ 35 ] 王怡娟, 姜永江, 陈梨柯. 养殖美国红鱼鱼肉中挥发性成分的研究[J]. *水产科学*, 2009, 28(6): 303–307. [ WANG Yijuan, LOU Yongjiang, CHEN Like. A study on the volatile components in the meat of cultured American red fish[J]. *Aquatic Science*, 2009, 28(6): 303–307. ]
- [ 36 ] 熊添, 吴燕燕, 李来好, 等. 卵形鲳鲹肌肉原料特性及食用品质的分析与评价[J]. *食品科学*, 2019, 40(17): 104–112. [ XIONG Tian, WU Yanyan, LI Laihao, et al. Analysis and evaluation of the raw material characteristics and edible quality of oval pomfret and catfish muscle[J]. *Food Science*, 2019, 40(17): 104–112. ]