

不同加工熟化度的烤鳗鱼经复热后非挥发性 滋味活性物质的变化

谢俊杰^{1,2}, 廖森泰^{2,3}, 邹宇晓^{2,3}, 王卫飞², 王思远², 陈福妮², 周东来², 穆利霞^{2,3,4*}

(1. 佛山大学食品科学与工程学院, 广东佛山 528225) (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. 化学与精细化工广东省实验室潮州分中心, 广东潮州 521000) (4. 佛山市顺德万汇美食工业研究有限公司, 广东佛山 528000)

摘要: 为明确不同加工熟化度的烤鳗鱼经微波复热和烤箱复热后非挥发性滋味活性物质的变化, 该研究在对其氯化物、甜菜碱、有机酸、核苷酸和游离氨基酸进行定性和定量分析的基础上, 结合电子舌智能评价特征滋味轮廓, 并通过滋味活性值 (Taste Activity Value, TAV) 和味精当量 (Equivalent Umami Concentration, EUC) 探究滋味物质的贡献和鲜味强度, 确定加工工艺对烤鳗鱼品质的影响。结果表明, 不同加工熟化度的烤鳗鱼经复热后, 其滋味物质含量和滋味属性存在显著差异 ($P<0.05$), 其中鲜味、咸味和复合味是其关键滋味特征; TAV 结果明确了氯化物、苹果酸、乳酸、琥珀酸、Glu 和 His 为烤鳗鱼的 6 种关键滋味活性物质 ($TAV>1$), 同时确定了微波和烤箱复热方式分别在全熟 (TAV 为 74.73) 和七成熟时 (TAV 为 81.83) 烤鳗鱼的滋味活性更强; EUC 结果表明不同加工熟化度的烤鳗鱼具有明显的鲜味特征, 其中烤箱复热对增强烤鳗鱼鲜味强度的效果更加显著, 且全熟时 (EUC 为 0.53 g/100 g) 鲜味贡献度最高。综上, 该研究为进一步探究烤鳗鱼加工过程中的非挥发性滋味活性物质提供更多的理论依据。

关键词: 烤鳗鱼; 滋味物质; 复热; 滋味活性值; 味精当量

文章编号: 1673-9078(2026)3-189-199

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.3.1900

Changes in the Non-volatile Taste-active Compounds of Grilled Eels with Different Processing Levels after Reheating

XIE Junjie^{1,2}, LIAO Sentai^{2,3}, ZOU Yuxiao^{2,3}, WANG Weifei², WANG Siyuan²,

CHEN Funi², ZHOU Donglai², MU Lixia^{2,3,4*}

(1.School of Food Science and Engineering, Foshan University, Foshan 528225, China) (2.Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Key Laboratory of Functional Food, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Sericulture and Agricultural Products Processing, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510610, China) (3.Chaozhou Branch Center of Chemistry and Fine Chemicals, Guangdong Provincial Laboratory, Chaozhou

引文格式:

谢俊杰, 廖森泰, 邹宇晓, 等. 不同加工熟化度的烤鳗鱼经复热后非挥发性滋味活性物质的变化[J]. 现代食品科技, 2026, 42(3): 189-199.

XIE Junjie, LIAO Sentai, ZOU Yuxiao, et al. Changes in the non-volatile taste-active compounds of grilled eels with different processing levels after reheating [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(3): 189-199.

收稿日期: 2024-12-22; 修回日期: 2025-03-03; 接受日期: 2025-03-10

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFF1103801); 广东省重点领域研发计划项目 (2023B0202080003); 广州市科技计划项目 (2023E04J1271; 2023E04J1270); 广东省科技专项 (“大专项+任务清单”) 项目—江门市科技计划项目 (江科【2021】183 号); 高水平广东省农业科技示范市建设资金市院合作项目 (2320060002440)

作者简介: 谢俊杰 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1454723352@qq.com

通讯作者: 穆利霞 (1980-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 食品风味, E-mail: lisa1980119@126.com

521000, China) (4.Foshan Shunde Wanhui Food Industry Research Co. Ltd., Foshan 528000, China)

Abstract: To clarify the changes that occur in non-volatile taste-active compounds found in grilled eels with different processing levels after microwave and oven reheating, qualitative and quantitative analyses of chlorides, betaine, organic acids, nucleotides, and free amino acids were performed. Based on these analyses, the characteristic taste profile was evaluated via electronic tongue assessment. In addition, the contribution and umami intensity of taste-active compounds were explored using the Taste Activity Value (TAV) and Equivalent Umami Concentration (EUC) to determine the effect processing techniques has on the quality of grilled eels. Significant differences were observed in the content of taste-active compounds and taste attributes among grilled eels with different processing levels after reheating. Umami, salty, and complex flavors were identified as key taste characteristics. TAV analysis revealed that chloride, malic acid, lactic acid, succinic acid, glutamic acid, and histidine were the six primary taste-active compounds present in grilled eels (TAV>1). Furthermore, the microwave- and oven-reheated grilled eels demonstrated stronger taste activity when they were fully (TAV=74.73) and 70% cooked (TAV=81.83), respectively. The EUC results confirmed that grilled eels with different processing levels displayed distinct umami characteristics. Notably, oven reheating exhibited a more pronounced effect on enhancing umami intensity, with the highest umami contribution noted when the eels were fully cooked (EUC=0.53 g/100 g). In summary, this study provides a theoretical foundation for further investigation into the non-volatile taste-active compounds involved in grilled eel processing.

Key words: roasted eel; taste compounds; reheating; taste activity value; equivalent umami concentration

鳗鱼 (*Astroconger myriaster*) 是世界上主要的经济鱼类之一。粮农组织 (FAO) 数据显示, 全世界每年生产约 300 000 t 鳗鱼, 商品贸易和生产价值约为 30 亿美元^[1]。烤鳗鱼作为最重要的消费形式之一, 以其独特的鲜味和滋味特征受到广大消费者的青睐。

烤鳗鱼是新鲜鳗鱼经过白烤、蒸制、蒲烧、预冷后经包装在 -18 ℃ 以下贮藏流通的鱼类产品^[2]。烤鳗鱼作为我国出口日本重要的贸易产品, 目前国内的制作工艺以日本的消费习惯为主^[3]。为迎合异国消费者的饮食习惯, 烤鳗鱼的热加工时间较长, 从而得到偏软嫩的感官品质。

食品的成分和加工方式直接影响滋味化合物的释放和感知^[1], 而品种的差异及质量变化使其最佳工艺条件各不相同, 故加热时间不宜过短或过长, 合理的加热时间才能赋予食物更好的质构、风味和滋味^[4]。因此, 了解烤鳗鱼加工过程中发生的特征性滋味释放机制可以进一步有助于优化产品品质、扩大市场需求和提高消费者接受度。水产品味道鲜美, 体内各种丰富的呈味物质赋予其独特的滋味。研究发现, 有机酸、核苷酸、游离氨基酸、甜菜碱是水产品中的主要滋味成分, 无机离子等则对滋味起协调的作用^[5]。目前, 关于水产品滋味的研究主要集中于虾蟹类和贝类, 鱼类滋味的研究相对较少^[6-8], 在河豚鱼^[9]、马鲛鱼^[10]和草鱼^[11]等相关研究明确了鲜味主要由有机酸、核苷酸、游离氨基酸、甜菜碱和无机离子等滋味物质所赋予。钟明慧等^[12]通过研究蒸制时间对鲟鱼肉滋味物质的影响, 发现蒸制时间在 12~16 min 时, 鲟鱼肉中的鲜味

氨基酸、甜味氨基酸和风味核苷酸含量较高, 滋味较好。王雪锋等^[13]在研究臭鳃鱼在发酵过程中滋味成分的变化规律时发现苹果酸、乳酸和天冬氨酸等 18 种滋味成分的变化与发酵过程相关, 使臭鳃鱼具有更加强烈的咸、酸、鲜、甜味。Huang 等^[14]通过对新鲜和烤鳗鱼的挥发性风味物质进行研究, 确定甲基丙基二硫醚、二甲基三硫醚、庚烷、辛烷和苡烯为烤鳗的关键特征挥发性风味物质。且此前关于鳗鱼特征滋味物质的研究暂无相关报道。

烤鳗鱼作为预制菜肴不仅滋味鲜美、营养丰富, 且食用方便, 消费者只需要简单复热处理即可食用。预制菜肴类食品食用前往往需要复热, 不同的复热方式对于产品的滋味和营养成分具有一定的影响^[15]。因此, 研究预制食品的加工熟化度和复热方式对鳗鱼的最终感官品质具有重要影响。为了获得烤鳗鱼最佳的终端食用品质, 本实验以复热后的不同加工熟化度的烤鳗鱼为研究对象, 分析其常见特征滋味物质的变化, 在结合电子舌智能感官评价烤鳗鱼的特征性滋味轮廓的基础上, 通过滋味活性值 (Taste Activity Value, TAV) 和味精当量 (Equivalent Umami Concentration, EUC) 综合分析比较其滋味属性的贡献和差异, 为明确烤鳗鱼特征滋味轮廓及关键滋味物质提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

新鲜鳗鱼购于台山市共荣食品有限公司, 体质量

为 400~500 g。将鳗鱼去头、骨、尾及内脏后，真空包装后置于 -20 ℃ 贮藏，备用。

盐酸、高氯酸、乙醚，均购于广东化学试剂厂；磷酸、磷酸二氢钾，均购于天津市科密欧化学试剂有限公司；氢氧化钠、铬酸钾、硝酸银、雷氏盐、三氯乙酸、氢氧化钾、酚酞、硝酸、丙酮，均购于天津市大茂化学试剂厂；甲醇、乙醇（色谱级），均购于赛默飞世尔科技（中国）有限公司；甜菜碱、苹果酸、乳酸、琥珀酸、5'-腺苷酸（adenosine5'-monophosphate, 5'-AMP）、5'-肌苷酸（inosine5'-monophosphate, 5'-IMP）、5'-鸟苷酸（guanosine5'-monophosphate, 5'-GMP），均购于上海源叶生物有限公司；17 种氨基酸混合标品，购于美国 Sigma 公司。铝箔真空袋（14 cm×20 cm），石家庄喜之龙包装有限公司；甲醇和乙醇均为色谱级，其它试剂均为分析纯。

1.2 仪器与设备

BP211D 分析天平、PB-10 pH 值计，赛多利斯科学仪器（北京）有限公司；X-8S 紫外分光光度计，上海元析仪器有限公司；IKA-T25 数显分散机，德国 IKA 公司；TDZ5-WS 离心机，湖南湘仪实验室仪器开发有限公司；Milli-Q Intgral5 纯水仪，德国 merk Millipore 公司；LC1200 高效液相色谱仪，美国 Agilent 公司；L-8900 全自动氨基酸分析仪，日本 HITACHI 公司；PT4012 电烤箱、M1-235E 微波炉，美的集团股份有限公司；8807 电子温度计，得力集团有限公司；ASTREE2 电子舌滋味分析仪，Alpha MOS 公司；BCD-451WDIYU1 冰箱，海尔智家股份有限公司。

1.3 方法

1.3.1 样品制备

该研究主要对烤鳗鱼加工工艺中白烤和蒸制工艺进行研究，具体工艺流程参照台山市共荣食品有限公司的生产规程稍作修改，其工艺确定为使用电烤箱 230 ℃ 白烤 0~15 min，随后迅速放入蒸锅中蒸制 0~8 min。鳗鱼置于 4 ℃ 解冻后取中段切成 10 cm×6 cm 大小的鱼块，通过控制白烤时间和蒸制时间来控制烤鳗鱼的熟化度，具体工艺分别为：三成熟（白烤 4.5 min，蒸制 2.4 min）、五成熟（白烤 7.5 min，蒸制 4 min）、七成熟（白烤 10.5 min，蒸制 5.6 min）、全熟（白烤 15 min，蒸制 8 min）。同时采用电子温度计监控烤鳗鱼的中心温度确定熟化度，获得三成熟（73.4~76.2 ℃）、五成熟（82.5~86.5 ℃）、七成熟（87.4~90.7 ℃）、全熟（93.4~97.1 ℃）的烤鳗鱼^[16]。具体评定条件见表 1。冷却后的烤鳗鱼选用铝箔包装袋对烤鳗鱼真空包装，

在 -20 ℃ 的条件下贮藏 7 d。

取贮藏 7 d 的烤鳗鱼制品于 4 ℃ 解冻 5 h 后，分别采用微波复热和烤箱复热两种复热方式进行复热。微波复热条件：中火间歇加热 4 min（总加热时长 4 min，每加热 30 s，间歇 30 s）；烤箱复热条件：烤箱 230 ℃ 加热 4 min。

表 1 烤鳗鱼不同加工熟化度判定表
Table 1 Determination of different processing maturity of roasted eel

熟化度	品质特点	中心温度/℃
三成熟	肉色洁白，汁水多且不易渗出，肉出现凝胶化富有弹性，体积收缩少	73.4~76.2
五成熟	肉色呈浅褐色，汁水较多，弹性较好，体积收缩较少	82.5~86.5
七成熟	肉色呈浅黄色，汁水较少，弹性一般，体积收缩较多	87.4~90.7
全熟	肉色呈金黄色，汁水少，弹性较差，体积收缩严重	93.4~97.1

1.3.2 氯化物的测定

参照国标 GB/T 5009.44-2016 的第三法（银量法）。

1.3.3 甜菜碱的测定

参照阮秋凤^[17]的方法稍作修改，称取 5.00 g 鳗鱼样品，加入 20 mL 超纯水，均质（10 000 r·min⁻¹×2）后置于 100 ℃ 水浴中加热 20 min，冷却过滤后离心（10 000 r·min⁻¹，4 ℃，15 min），取上清液 1 mL，稀释至 5 mL，经冰浴冷却 15 min 后，用浓盐酸调节 pH 值到 1 后加入雷氏盐溶液 5 mL，充分振摇后在 4 ℃ 冰箱静置 4 h。静置后离心（10 000 r·min⁻¹，20 min），沉淀用 5 mL 99% 乙醚洗涤（体积分数），弃上清液，待乙醚自然挥发后加 5 mL 70% 丙酮溶液（体积分数）将甜菜碱雷氏盐结晶溶解，至 525 nm 处测定吸光值，作试剂空白，平行测定三组。

甜菜碱标准曲线的制作：将甜菜碱标准溶液（1 mg·mL⁻¹）配置为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 mg·mL⁻¹ 的质量浓度，在相同的条件下测定，将所得吸光值和对应质量浓度做标准曲线，回归方程为 $y=0.229\ 4x+2.980\ 2$ （ $R^2=0.998\ 9$ ）。

1.3.4 有机酸的测定

参照 Chen 等^[18]的方法稍作修改，称取 5.00 g 鳗鱼样品，加入 20 mL 超纯水，均质（10 000 r·min⁻¹×2），离心（8 500 r·min⁻¹，4 ℃，15 min），取上清液，过 0.45 μm 水相滤膜，待上机测定。每组样品平行测定三次。

混合标准品溶液的配制：将苹果酸、乳酸、琥珀酸标准品溶液（30 mg·mL⁻¹）分别配置为 5 000、4 500、4 000、3 500、3 000、2 500 μg·mL⁻¹ 的质量浓度，在相同的条件下测定，将所得峰面积和对应浓

度做标准曲线, 回归方程分别为: $y=0.356\ 9x-263.51$, $R^2=0.999\ 3$ (苹果酸); $y=0.736x+84.702$, $R^2=0.998\ 5$ (乳酸); $y=0.691\ 2x+164.5$, $R^2=0.999\ 1$ (琥珀酸)。

高效液相色谱条件: ZORBAX SB-C18, 4.6×250 mm, 5 μm 色谱柱; 柱温: 40 $^{\circ}\text{C}$; 进样量: 20 μL ; 检测波长: 210 nm; 流动相 (体积分数): A 为 0.1% 磷酸溶液, B 为甲醇。洗脱程序: 95 : 5% 等度洗脱 12 min; 流速 1 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

1.3.5 核苷酸的测定

参照黄煜燃等^[10]的方法稍作修改, 称取 10.00 g 鳗鱼样品, 加入已预冷的 30 mL 5% 高氯酸溶液 (体积分数), 均质 (10 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}\times 3$), 离心 (8 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, 4 $^{\circ}\text{C}$, 15 min), 取上清液, 沉淀物再用 10 mL 相同浓度的高氯酸重复以上步骤, 合并 2 次上清液, 用 5 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氢氧化钾溶液调节 pH 值到 6.5, 然后过 0.45 μm 水相滤膜, 待上机测定。每组样品平行测定三次。

混合标准品溶液的配制: 将 5'-GMP、5'-IMP、5'-AMP 标准品溶液 (5 $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$) 配置为 500、400、300、200、100、50 $\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的质量浓度, 在相同的条件下测定, 将所得峰面积和对应浓度做标准曲线, 回归方程分别为: $y=35.413x+121.54$, $R^2=0.998\ 5$ (5'-GMP); $y=50.877x+193.35$, $R^2=0.999\ 8$ (5'-IMP); $y=56.522x+200.41$, $R^2=1$ (5'-AMP)。

高效液相色谱条件: ZORBAX SB-C18, 4.6×250 mm, 5 μm 色谱柱; 柱温: 30 $^{\circ}\text{C}$; 进样量: 20 μL ; 检测波长: 254 nm; 流动相: A 为 0.05 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 磷酸二氢钾缓冲液, B 为甲醇。洗脱程序 (体积分数): 0 min, 100%A, 保持 10 min; 11 min, 95%A, 保持 3 min; 14 min, 100%A, 保持 5 min; 流量 0.8 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 。

1.3.6 游离氨基酸测定

参考 Yu 等^[19]的方法稍作修改, 称取 4.00 g 鳗鱼样品, 加入 30 mL 15% 三氯乙酸溶液 (体积分数), 均质 (10 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}\times 2$) 后静置 2 h 充分反应, 离心 (1 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, 4 $^{\circ}\text{C}$, 15 min), 过滤取 5 mL 上清液, 用 5 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 1 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 氢氧化钠溶液调节 pH 值至 2.2, 转入 10 mL 容量瓶中, 定容, 振荡均匀后过 0.22 μm 水相膜, 待上机测定。每组样品平行测定三次。

1.3.7 电子舌的测定

参考高可安等^[20]的方法稍作修改, 称取 15.00 g 鳗鱼样品, 加入 100 mL 超纯水, 均质 (8 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}\times 2$), 离心 (10 000 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$, 4 $^{\circ}\text{C}$, 10 min), 用定性滤纸过滤上清液并收集滤液。采用电子舌滋味分析仪的 7 个传感器测定响应值。电子舌检测系统活化 24 h, 完成

自检。参数: 延迟时间 0 s, 获取时间 120 s, 搅拌速率 60 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 。每组样品平行测定三次。

1.3.8 TAV及EUC的计算

味觉活性值 (Taste Activity Value, TAV), 通常当 $\text{TAV}<1$ 时, 表示该物质对滋味贡献不大, 当 $\text{TAV}>1$ 时, 表示该物质对滋味贡献较大。计算公式如下^[21]:

$$T = \frac{C}{T} \quad (1)$$

式中:

T ——味觉活性值, TAV, $\text{mg}/100\text{ g}$ 。

C ——滋味物质的含量, $\text{mg}/100\text{ g}$;

T ——滋味物质的味道阈值, $\text{mg}/100\text{ g}$ 。

味精当量 (Equivalent Umami Concentration, EUC), 计算公式如下^[22]:

$$E = \sum \alpha_i \beta_i + 1218 (\sum \alpha_i \beta_i) (\sum \alpha_j \beta_j) \quad (2)$$

式中:

E ——EUC, 按每 100 g 样品含谷氨酸钠 (Monosodium Glutamate, MSG) 质量计 ($\text{g}/100\text{ g}$), MSG 滋味阈值为 0.03 $\text{g}/100\text{ g}$;

α_i ——鲜味氨基酸 (Asp、Glu) 的含量 ($\text{g}/100\text{ g}$);

β_i ——鲜味氨基酸相对于 MSG 的相对鲜度系数 (Glu 为 1, Asp 为 0.077);

α_j ——呈味核苷酸 (AMP、IMP、GMP) 的含量 ($\text{g}/100\text{ g}$);

β_j ——呈味核苷酸相对于 IMP 的相对鲜度系数 (AMP 为 0.18、IMP 为 1、GMP 为 2.3);

1218——协同作用常数。

1.4 数据处理与分析

实验数据均为 3 次平行测定结果的平均值, 数据以平均值 $\pm$ 标准差表示。通过 Microsoft Excel 2021、Origin 2021 和 GraphPad Prism 9.5 软件进行数据处理与作图, 并采用 IBM SPSS Statistics 26 软件进行统计学分析, $P<0.05$ 被认为具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 氯化物含量分析

氯化物属于呈味无机离子, 作为最主要的咸味贡献物质, 它是水产品形成特征滋味不可缺少的鲜味增强物, 能与其它滋味物质产生协同作用^[23]。不同加工熟化度的鳗鱼复热后的氯化物含量变化如图 1 所示: 随着加工熟化度的增加, 氯化物含量显著提高, 呈先升后降趋势, 其中微波复热样品中五成熟时含量最高 (1.78 $\text{g}/100\text{ g}$), 烤箱复热样品中七成熟时含量最高 (1.77 $\text{g}/100\text{ g}$)。加工熟化度在三成熟和五成熟时微波复热的氯化物含量显著高于烤箱复热, 而在七成熟和全熟时则低于烤箱复热。氯化物作为可溶性盐, 在水

分蒸发的同时，其浓度相对增加，从而导致肉中氯化物含量在加工初期呈现升高的趋势^[24]。但随着水分的持续减少，肉的质地逐渐变硬，氯化物的随着渗透速度的减少和渗透压力的增加，其含量的增加速度逐渐减缓，与此同时汁液的流失也会带走鱼体中的部分氯化物，导致其含量的改变^[25,26]。

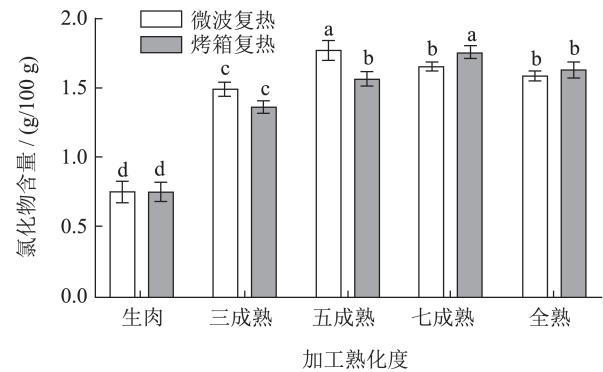


图 1 烤鳗鱼中氯化物的含量变化

Fig.1 Variation of chloride content in roasted eel

注：图中小写字母表示具有显著性差异 ($P<0.05$)。下图同。

2.2 甜菜碱含量分析

甜菜碱是多种甜菜碱的总称（如甘氨酸甜菜碱、 β -丙氨酸甜菜碱和龙虾肌碱等），作为呈味物质赋予水产品特殊的甜味^[27]。不同加工熟化度的鳗鱼经复热后的甜菜碱含量变化如图 2 所示：随着加工熟化度的增加，鳗鱼复热后甜菜碱的含量均呈现先升后降趋势，其中七成熟时甜菜碱含量均最高，分别为 1.48 mg/100 g 和 1.51 mg/100 g。微波复热的热传递效率比烤箱复热快，使得更多的甜菜碱损失，含量降低，导致不同加工熟化度样品的甜菜碱含量整体低于烤箱复热。推测其原因可能是在热加过程中，鱼肉水分蒸发、甜菜碱的氧化还原反应以及蛋白质和脂质发生代谢作用共同导致甜菜碱含量的改变^[28,29]。

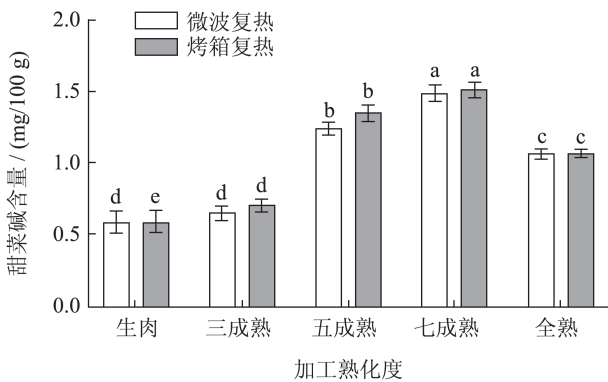


图 2 鳗鱼中甜菜碱的含量变化

Fig.2 Change of betaine content in roasted eel

2.3 有机酸含量分析

有机酸由糖原和氨基酸降解生成，对水产品滋味有重要影响，其中乳酸和琥珀酸是主要的滋味活性物质，而其它有机酸相互作用提供酸味和鲜味^[30]。表 2 结果表明：随着加工熟化度的提高，复热后样品中的苹果酸含量均显著上升，乳酸呈现先降低后增加再降低的变化趋势，而琥珀酸含量显著下降。由结果可知，烤鳗鱼中以苹果酸为主，其含量远高于其它有机酸，全熟样品再复热时含量均最高，分别为 913.42 mg/100 g、1 008.53 mg/100 g；在生肉中乳酸和琥珀酸含量均最高，分别为 240.55 mg/100 g、67.45 mg/100 g，而随着加工熟化度的提高，乳酸呈先升后降趋势，琥珀酸呈下降趋势。此外，烤箱复热对烤鳗鱼有机酸含量的不良影响较少，说明能更好的保持其原有的滋味。有机酸与芳香族化合物、氨基酸和酯类的合成和代谢密切相关，苹果酸含量升高主要是糖原和氨基酸降解导致，乳酸和琥珀酸含量下降可能是加热和复热过程中发生脱羧导致^[27]。

表 2 烤鳗鱼中有机酸的含量变化 (mg/100 g)

Table 2 Changes of organic acid content in roasted eel (mg/100 g)

滋味特性		苹果酸	乳酸	琥珀酸
		酸味/苦味 (-)	酸味/涩味 (+)	酸味/鲜味 (+)
微波复热	生肉	337.08 ± 24.46 ^d	240.55 ± 12.86 ^a	67.45 ± 3.17 ^a
	三成熟	367.35 ± 12.48 ^d	72.55 ± 0.65 ^d	42.36 ± 5.08 ^b
	五成熟	411.48 ± 12.65 ^c	193.06 ± 1.94 ^b	20.07 ± 0.54 ^c
	七成熟	785.86 ± 44.81 ^b	195.12 ± 0.16 ^b	9.09 ± 2.92 ^d
	全熟	913.42 ± 62.92 ^a	162.53 ± 0.51 ^c	7.31 ± 3.71 ^d
烤箱复热	生肉	337.08 ± 24.46 ^d	240.55 ± 12.86 ^a	67.45 ± 3.17 ^{ab}
	三成熟	348.97 ± 12.53 ^d	91.39 ± 18.67 ^d	51.15 ± 2.66 ^a
	五成熟	378.01 ± 13.20 ^c	218.50 ± 11.76 ^b	38.29 ± 1.93 ^{ab}
	七成熟	849.45 ± 29.46 ^b	210.90 ± 7.34 ^b	33.51 ± 2.95 ^b
	全熟	1 008.53 ± 59.34 ^a	184.79 ± 1.94 ^c	28.88 ± 2.11 ^b

注：同列右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P<0.05$)。下表同。

2.4 核苷酸含量分析

核苷酸及其相关化合物作为重要的滋味活性物质，与游离氨基酸具有协同作用，能产生独特的鲜味，在水产品中起着至关重要的作用^[18]。GMP、AMP、IMP 作为增强鲜味的主要核苷酸，阈值较低，被认为是评估肉类品质的关键滋味标志物^[6]。表 3 结果表明：随着加工熟化度的提高，复热后鳗鱼中 GMP、IMP、AMP

等核苷酸的含量均显著增加 ($P<0.05$), 且在两种复热方式中的变化趋势一致。GMP 含量均呈上升趋势, IMP 和 AMP 呈先升后降趋势, 其中三成熟时 AMP 含量最高, 分别为 22.81 mg/100 g、19.80 mg/100 g ; 七成熟时 IMP 含量最高, 分别为 1.29 mg/100 g、1.43 mg/100 g ; 全熟时 GMP 含量最高, 分别为 1.47 mg/100 g、1.58 mg/100 g。其中 AMP 在总体核苷酸中占比最高, 其次是 GMP 和 IMP, 表明 AMP 是烤鳗鱼的主要鲜味核苷酸。三磷酸腺苷 (ATP) 作为核苷酸的前体物质, 在加工过程中会发生一系列降解反应, 生成二磷酸腺苷 (ADP) 等中间产物, ADP 在鳗鱼加热和复热过程中发生热转化生成 AMP, AMP 进一步转化为 GMP 和 IMP, 从而导致 GMP、IMP 和 AMP 含量均呈现增加的趋势^[31]。

表 3 烤鳗鱼中核苷酸的含量变化 (mg/100 g)
Table 3 Changes of nucleotide content in roasted eel (mg/100 g)

滋味特征		GMP	IMP	AMP
		鲜味 (+)	鲜味 (+)	甜味 (+)
微波复热	生肉	0.47 ± 0.05 ^c	0.36 ± 0.11 ^c	9.52 ± 1.00 ^d
	三成熟	0.63 ± 0.04 ^d	0.86 ± 0.09 ^d	22.81 ± 0.17 ^a
	五成熟	0.80 ± 0.05 ^c	1.19 ± 0.03 ^b	17.78 ± 0.72 ^b
	七成熟	1.07 ± 0.02 ^b	1.29 ± 0.03 ^a	16.81 ± 0.51 ^b
	全熟	1.47 ± 0.02 ^a	1.01 ± 0.13 ^c	15.22 ± 0.12 ^c
烤箱复热	生肉	0.47 ± 0.05 ^c	0.36 ± 0.11 ^c	9.52 ± 1.00 ^d
	三成熟	0.74 ± 0.04 ^d	0.94 ± 0.03 ^d	19.80 ± 0.15 ^a
	五成熟	0.90 ± 0.02 ^c	1.12 ± 0.02 ^c	17.63 ± 0.21 ^b
	七成熟	1.09 ± 0.04 ^b	1.43 ± 0.01 ^a	16.20 ± 0.27 ^c
	全熟	1.58 ± 0.12 ^a	1.17 ± 0.02 ^b	15.58 ± 0.06 ^c

表 4 微波复热后烤鳗鱼中游离氨基酸的含量变化 (mg/100 g)

Table 4 Changes of nucleotide content in roasted eel after microwave reheating (mg/100 g)

氨基酸种类	滋味特性	含量 (mg/100 g)				
		生肉	三成熟	五成熟	七成熟	全熟
天冬氨酸 Asp	鲜味 (+)	ND	ND	ND	ND	ND
谷氨酸 Glu	鲜味 (+)	29.50 ± 0.22 ^d	36.30 ± 0.23 ^b	36.11 ± 0.59 ^{bc}	35.49 ± 0.28 ^c	37.80 ± 0.58 ^a
丝氨酸 Ser	甜味 (+)	5.68 ± 0.13 ^c	6.30 ± 0.10 ^b	6.50 ± 0.34 ^b	5.78 ± 0.20 ^c	7.66 ± 0.28 ^a
甘氨酸 Gly	甜味 (+)	7.25 ± 0.16 ^a	6.52 ± 0.09 ^b	6.53 ± 0.26 ^b	5.60 ± 0.35 ^c	7.08 ± 0.18 ^a
苏氨酸 Thr	甜味 (+)	4.76 ± 0.14 ^c	5.01 ± 0.10 ^{bc}	5.43 ± 0.30 ^b	4.74 ± 0.29 ^c	6.09 ± 0.25 ^a
丙氨酸 Ala	甜味 (+)	11.43 ± 0.25 ^b	13.25 ± 0.20 ^a	13.46 ± 0.62 ^a	13.63 ± 0.38 ^a	13.95 ± 0.46 ^a
脯氨酸 Pro	甜味 / 苦味 (+)	3.78 ± 0.13 ^c	4.06 ± 0.23 ^{bc}	4.55 ± 0.33 ^b	4.39 ± 0.19 ^b	5.46 ± 0.14 ^a
精氨酸 Arg	甜味 / 苦味 (+)	1.69 ± 0.04 ^c	2.12 ± 0.02 ^c	2.87 ± 0.23 ^b	2.20 ± 0.56 ^c	3.59 ± 0.22 ^a
赖氨酸 Lys	甜味 / 苦味 (-)	6.98 ± 0.18 ^c	10.70 ± 0.15 ^a	11.00 ± 0.78 ^a	9.21 ± 0.26 ^b	11.78 ± 0.77 ^a
缬氨酸 Val	苦味 (-)	5.67 ± 0.16 ^c	6.35 ± 0.21 ^b	6.50 ± 0.22 ^b	6.14 ± 0.21 ^{bc}	7.79 ± 0.39 ^a
酪氨酸 Tyr	苦味 (-)	3.24 ± 0.59 ^a	3.82 ± 0.15 ^a	3.25 ± 0.31 ^a	2.95 ± 0.19 ^a	4.07 ± 0.33 ^a
苯丙氨酸 Phe	苦味 (-)	3.90 ± 0.19 ^a	3.71 ± 0.26 ^a	3.01 ± 0.09 ^a	2.74 ± 0.10 ^a	3.64 ± 0.07 ^a
异亮氨酸 Ile	苦味 (-)	2.40 ± 0.13 ^d	3.77 ± 0.23 ^b	3.01 ± 0.19 ^c	2.82 ± 0.20 ^c	4.40 ± 0.33 ^a
亮氨酸 Leu	苦味 (-)	3.77 ± 0.24 ^c	4.95 ± 0.36 ^b	4.53 ± 0.32 ^{bc}	4.28 ± 0.18 ^{bc}	6.08 ± 0.45 ^a
蛋氨酸 Met	苦味 (-)	2.20 ± 0.01 ^d	3.16 ± 0.26 ^b	2.80 ± 0.13 ^c	2.76 ± 0.11 ^c	4.17 ± 0.61 ^a
组氨酸 His	苦味 (-)	13.17 ± 0.30 ^d	18.77 ± 0.40 ^b	13.43 ± 0.65 ^d	16.33 ± 0.55 ^c	20.89 ± 1.01 ^a
鲜味氨基酸		29.50 ± 0.22 ^c	36.30 ± 0.23 ^b	36.11 ± 0.59 ^b	35.49 ± 0.28 ^b	37.80 ± 0.58 ^a
甜味氨基酸		34.59 ± 0.85 ^c	37.25 ± 0.74 ^{bc}	39.33 ± 2.08 ^b	36.33 ± 1.97 ^c	43.83 ± 1.53 ^a
苦味氨基酸		41.32 ± 1.80 ^d	55.23 ± 2.02 ^b	47.54 ± 2.69 ^c	47.23 ± 1.80 ^c	62.82 ± 3.96 ^a
总游离氨基酸		105.40 ± 2.87 ^d	128.78 ± 2.99 ^b	122.99 ± 5.36 ^{bc}	119.05 ± 4.05 ^c	144.45 ± 6.07 ^a

注：表中同行右肩不同的小写字母表示具有显著差异 ($P<0.05$), ND 表示未检出。下表同。

表 5 烤箱复热后烤鳗鱼中游离氨基酸的含量变化 (mg/100 g)
Table 5 Changes of nucleotide content in roasted eel after oven reheating (mg/100 g)

氨基酸种类	滋味特性	含量 (mg/100 g)				
		生肉	三成熟	五成熟	七成熟	全熟
天冬氨酸 Asp	鲜味 (+)	ND	ND	ND	ND	ND
谷氨酸 Glu	鲜味 (+)	29.50 ± 0.22 ^c	38.36 ± 0.18 ^b	37.96 ± 0.18 ^c	37.11 ± 0.24 ^d	40.01 ± 0.77 ^a
丝氨酸 Ser	甜味 (+)	5.68 ± 0.13 ^c	8.22 ± 0.18 ^{ab}	7.77 ± 0.96 ^{ab}	6.88 ± 0.80 ^{bc}	8.93 ± 0.46 ^a
甘氨酸 Gly	甜味 (+)	7.25 ± 0.16 ^b	8.05 ± 0.14 ^a	7.83 ± 0.20 ^a	7.88 ± 0.14 ^a	7.69 ± 0.12 ^a
苏氨酸 Thr	甜味 (+)	4.76 ± 0.14 ^b	6.44 ± 0.24 ^a	6.51 ± 0.87 ^a	5.90 ± 0.76 ^{ab}	7.07 ± 0.43 ^a
丙氨酸 Ala	甜味 (+)	11.43 ± 0.2 ^{5c}	16.49 ± 0.40 ^a	16.07 ± 0.71 ^a	14.22 ± 0.73 ^b	14.91 ± 0.29 ^b
脯氨酸 Pro	甜味 / 苦味 (+)	3.78 ± 0.13 ^d	5.70 ± 0.16 ^{ab}	5.40 ± 0.39 ^{bc}	4.85 ± 0.53 ^c	6.29 ± 0.31 ^a
精氨酸 Arg	甜味 / 苦味 (+)	1.69 ± 0.04 ^c	2.92 ± 0.14 ^b	3.20 ± 0.48 ^b	3.41 ± 0.59 ^b	4.42 ± 0.47 ^a
赖氨酸 Lys	甜味 / 苦味 (-)	6.98 ± 0.18 ^c	13.12 ± 0.31 ^a	13.11 ± 0.82 ^a	11.50 ± 0.44 ^b	13.39 ± 0.22 ^a
缬氨酸 Val	苦味 (-)	5.67 ± 0.16 ^b	7.72 ± 0.09 ^a	7.51 ± 0.26 ^a	7.13 ± 0.81 ^a	8.28 ± 0.60 ^a
酪氨酸 Tyr	苦味 (-)	3.24 ± 0.59 ^a	4.78 ± 0.20 ^a	3.83 ± 0.50 ^a	3.58 ± 0.47 ^a	4.79 ± 0.18 ^a
苯丙氨酸 Phe	苦味 (-)	3.90 ± 0.19 ^a	4.58 ± 0.21 ^a	3.50 ± 0.41 ^a	3.27 ± 0.44 ^a	4.36 ± 0.48 ^a
异亮氨酸 Ile	苦味 (-)	2.40 ± 0.13 ^b	4.30 ± 0.38 ^a	3.59 ± 0.49 ^{ab}	3.35 ± 0.46 ^{ab}	4.68 ± 0.69 ^a
亮氨酸 Leu	苦味 (-)	3.77 ± 0.24 ^c	5.95 ± 0.62 ^{ab}	5.39 ± 0.70 ^{ab}	5.11 ± 0.67 ^b	6.55 ± 0.55 ^a
蛋氨酸 Met	苦味 (-)	2.20 ± 0.01 ^c	3.71 ± 0.36 ^{ab}	3.23 ± 0.32 ^{bc}	3.21 ± 0.36 ^{bc}	4.34 ± 0.60 ^a
组氨酸 His	苦味 (-)	13.17 ± 0.30 ^d	21.08 ± 0.36 ^c	20.87 ± 0.39 ^c	23.06 ± 0.30 ^b	26.85 ± 0.87 ^a
鲜味氨基酸		29.50 ± 0.22 ^c	38.36 ± 0.18 ^b	37.96 ± 0.18 ^c	37.11 ± 0.24 ^d	40.01 ± 0.77 ^a
甜味氨基酸		34.59 ± 0.85 ^b	47.83 ± 1.26 ^a	46.77 ± 3.61 ^a	43.15 ± 3.55 ^a	49.30 ± 2.08 ^a
苦味氨基酸		41.32 ± 1.80 ^c	65.25 ± 2.53 ^b	61.02 ± 3.89 ^b	60.20 ± 3.95 ^b	73.22 ± 5.09 ^a
总游离氨基酸		105.40 ± 2.87 ^d	151.43 ± 3.97 ^{ab}	145.75 ± 7.68 ^{bc}	139.46 ± 7.74 ^c	162.54 ± 7.04 ^a

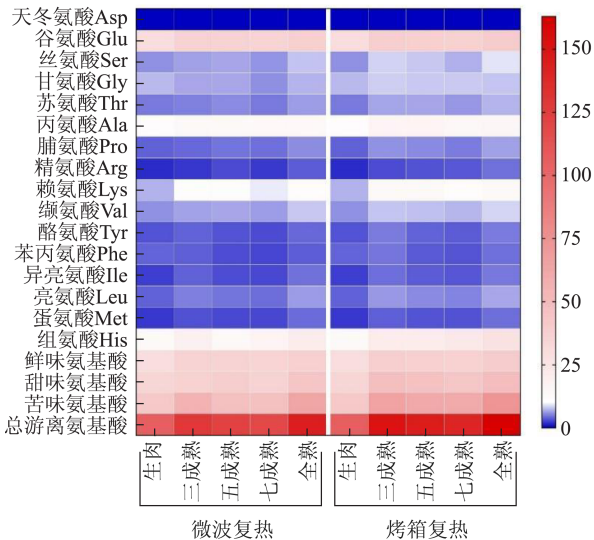


图 3 烤鳗鱼中游离氨基酸的含量变化热图
Fig.3 Variation heat map of free amino acid content in roasted eel

2.5 游离氨基酸含量分析

游离氨基酸作为许多滋味化合物的前体物质，可以改善食品的整体滋味，在水产品的滋味特性中起着重要作用，根据呈味特性，游离氨基酸可分为鲜味氨

基酸、甜味氨基酸和苦味氨基酸^[32]。不同加工熟化度的烤鳗鱼经复热后的氨基酸含量变化如表 4、5 和图 3 所示，烤鳗鱼中共检出 15 种游离氨基酸，其中鲜味氨基酸 1 种（Glu）、甜味氨基酸 6 种（Ser、Gly、Thr、Ala、Pro、Arg）、苦味氨基酸 8 种（Lys、Val、Tyr、Phe、Ile、Leu、Met、His）。其中苦味氨基酸含量最高（微波复热为 41.32~62.82 mg/100 g、烤箱复热为 41.32~73.22 mg/100 g），其次是甜味氨基酸（微波复热为 34.59~43.83 mg/100 g、烤箱复热为 34.59~49.30 mg/100 g）和鲜味氨基酸（微波复热为 29.50~37.80 mg/100 g、烤箱复热为 29.50~40.01 mg/100 g），经复热后烤鳗鱼的鲜味氨基酸、甜味氨基酸、苦味氨基酸和总游离氨基酸含量随着加工熟化度的提高总体呈现显著增加的趋势（*P* < 0.05）。

表中结果表明，鳗鱼经过烤制、复热处理后的氨基酸含量依次为苦味氨基酸 > 甜味氨基酸 > 鲜味氨基酸。苦味氨基酸能与鲜味氨基酸和甜味氨基酸相互作用增强其滋味的丰富性，改善口感，因此高含量的苦味氨基酸并不意味着鱼肉的滋味受到不良影响。鳗鱼中苦味氨基酸以 His 和 Lys 为主，且复热后其含量

均显著增加,其中 His 和 Lys 在微波复热后含量分别为 13.17~20.89、6.98~11.78 mg/100 g,烤箱复热后含量分别为 13.17~26.85、6.98~13.39 mg/100 g,该现象可能归因于加工过程中蛋白肽(尤其是寡肽)的断裂。甜味氨基酸在赋予水产品愉悦甜味的同时还能降低苦味,从而减少其不愉悦的滋味^[13]。鳗鱼中甜味氨基酸以 Ala 和 Gly 为主,微波复热后 Ala 含量显著增加($P<0.05$)含量为 11.43~13.95 mg/100 g, Gly 含量下降,含量为 5.60~7.25 mg/100 g;但烤箱复热后 Ala 含量呈现先增后减,总体增加的趋势, Gly 呈现增加趋势,分别为 11.43~16.49、7.25~8.05 mg/100 g。鲜味并非单一滋味,它能使甜、苦、咸、酸等味道得到平衡,还可以赋予水产品独特滋味,有助于增强整体味道^[33]。Glu 和 Asp 作为与水产品味道特征最相关的两种鲜味氨基酸,其协同作用可以增强水产品的整体鲜味感知,形成类似于味精(MSG)的滋味^[30]。烤鳗鱼复热后 Glu 含量均显著增加,其中在微波复热后含量为 29.50~37.80 mg/100 g,烤箱复热后含量为 29.50~40.01 mg/100 g。样品中未检出 Asp。鳗鱼在加热和复热过程中游离氨基酸含量产生波动,其原因可能是高温条件下游离氨基酸发生脱氨、脱羧等化学反应转化为烃、醛、胺等物质,导致其含量降低;而同时蛋白质的降解和美拉德反应,造成部分游离氨基酸含量的增加^[34-36]。对比表 4、5 和图 3 的数据发现,随着加工熟化度的提高,烤箱复热后鳗鱼中的鲜味氨基酸、甜味氨基酸、苦味氨基酸及总游离氨基酸含量均高于微波复热样品($P<0.05$),表明烤箱复热可以在一定程度上提高鳗鱼的滋味属性,推测可能是微波高效的热传递效率加速了游离氨基酸的热降解。

2.6 电子舌滋味分析

食物味道的呈现是一个复杂的过程,而滋味化合物含量的变化并不能直接代表整体滋味属性,因此电子舌常被用来对食品的滋味轮廓进行辅助评价,从而增加滋味特征分析的客观视角^[37]。由图 4、5 可知,不同加工熟化度的烤鳗鱼通过不同方式复热后的滋味属性具有一定的相似性,各滋味的响应值大小表明鲜味、咸味和复合味是其关键的滋味特征,其中鲜味和咸味呈现显著增强的趋势,而甜味则呈现下降趋势。究其原因可能是蛋白质降解及鲜味氨基酸与风味核苷酸之间的协同作用增强了鲜味^[38];咸味的增强是美拉德反应产物的盐度增强效应所致^[28];糖原和氨基酸降解导致甜味下降^[39];氯化钠和某些酸可以抑制和减少苦味,最终表现出鲜味特征^[40]。

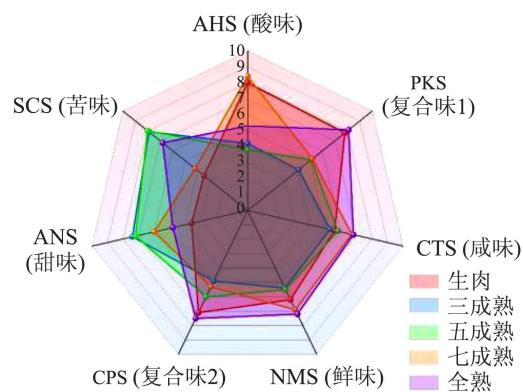


图 4 微波复热后烤鳗鱼滋味雷达图

Fig.4 Radar chart of roasted eel taste after microwave reheating

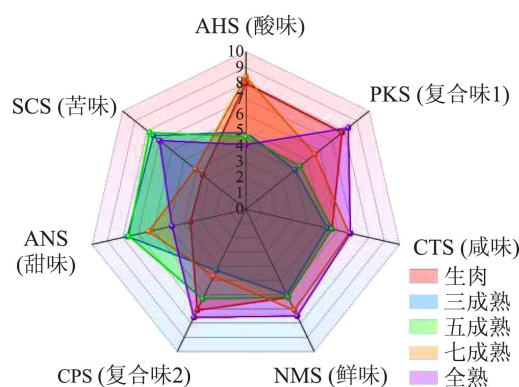


图 5 烤箱复热后烤鳗鱼滋味雷达图

Fig.5 Radar chart of roasted eel taste after oven reheating

在主成分图中,区域间的距离反映了样品的差异性,距离越远则说明差异越显著;区域面积则反映了电子舌对该样品的重复性,面积越小则表明识别的重复性越好,反之则说明误差越大^[32]。不同加工熟化度的烤鳗鱼复热后的电子舌主成分如图 6 所示,微波复热后主成分 1 和 2 的贡献率分别为 80.43%、13.58%,其累积贡献率达 94.01%;烤箱复热后主成分 1 和 2 的贡献率分别为 87.98%、4.78%,其累积贡献率达 92.76%,贡献率越高越能反映原始指标的信息。从各组样品滋味轮廓的相对位置看,生肉与经过加工后的烤鳗鱼相比味道差异明显,其中三成熟和五成熟在两种复热方式处理后,两者出现了部分重叠,表明两者滋味差异不明显。不同加工熟化度的烤鳗鱼经复热后均与生肉样品存在显著差异,其中微波复热后全熟样品与其它成熟度样品的距离较远,表明全熟样品复热后整体滋味变化最大,这与前期游离氨基酸结果一致。烤箱复热后七成熟样品与其它成熟度样品的距离较远,表明七成熟样品复热后整体滋味变化最大,这与氯化物和甜菜碱含量的结果一致。

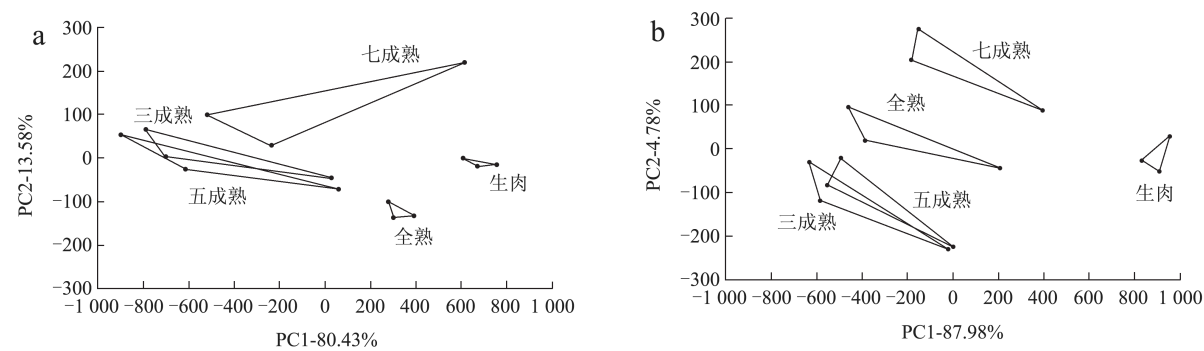


图 6 烤鳗鱼电子舌响应数据主成分图

Fig.6 Principal component diagram of response data of roasted eel electronic tongue

注：(a) 微波复热，(b) 烤箱复热。

表 6 烤鳗鱼的TAV

Table 6 TAV of roasted eel

滋味物质	生肉	微波复热				烤箱复热				阈值 / (mg/100g) ^[10,13]
		三成熟	五成熟	七成熟	全熟	三成熟	五成熟	七成熟	全熟	
氯化物	23.96	46.99	55.74	52.06	49.98	42.84	49.29	55.28	51.37	32
甜菜碱	0.24	0.26	0.50	0.59	0.42	0.28	0.54	0.60	0.43	250
苹果酸	6.80	7.41	8.30	15.84	18.42	7.04	7.62	17.13	20.33	49.6
乳酸	1.91	0.58	1.53	1.55	1.29	0.73	1.73	1.67	1.47	126
琥珀酸	6.36	4.00	1.89	0.86	0.69	4.83	3.61	3.16	2.72	10.6
GMP	0.04	0.05	0.06	0.09	0.12	0.06	0.07	0.09	0.13	12.5
IMP	0.01	0.03	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	0.06	0.05	25
AMP	0.19	0.46	0.36	0.34	0.30	0.40	0.35	0.32	0.31	50
谷氨酸 Glu	0.98	1.21	1.20	1.18	1.26	1.28	1.27	1.24	1.33	30
丝氨酸 Ser	0.04	0.04	0.04	0.04	0.05	0.05	0.05	0.05	0.06	150
甘氨酸 Gly	0.06	0.05	0.05	0.04	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	130
苏氨酸 Thr	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03	260
丙氨酸 Ala	0.19	0.22	0.22	0.23	0.23	0.27	0.27	0.24	0.25	60
脯氨酸 Pro	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	300
精氨酸 Arg	0.03	0.04	0.06	0.04	0.07	0.06	0.06	0.07	0.09	50
赖氨酸 Lys	0.14	0.21	0.22	0.18	0.24	0.26	0.26	0.23	0.27	50
缬氨酸 Val	0.14	0.16	0.16	0.15	0.19	0.19	0.19	0.18	0.21	40
酪氨酸 Tyr	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	91
苯丙氨酸 Phe	0.04	0.04	0.03	0.03	0.04	0.05	0.04	0.04	0.05	90
异亮氨酸 Ile	0.03	0.04	0.03	0.03	0.05	0.05	0.04	0.04	0.05	90
亮氨酸 Leu	0.02	0.03	0.02	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	190
蛋氨酸 Met	0.07	0.11	0.09	0.09	0.14	0.12	0.11	0.11	0.14	30
组氨酸 His	0.66	0.94	0.67	0.82	1.04	1.05	1.04	1.15	1.34	20
总 TAV	41.98	62.94	71.30	74.28	74.73	59.77	66.77	81.83	80.79	

2.7 TAV及EUC值的影响

滋味化合物的含量和阈值之比可以客观的反映滋味的强度,用TAV来表示^[39]。不同加工熟化度的烤鳗鱼经复热后的TAV如表6所示:烤鳗鱼在两种复热方式后的氯化物、苹果酸、乳酸(三成熟除外)、琥珀酸(微波复热中的七成熟和全熟除外)、Glu(生肉除外)和His(生肉和微波复热中的三、五、七成熟除外)的TAV均大于1,表明该6种呈味物质对整体滋味具有重要贡献,是鳗鱼烤制过程中的关键滋味物质。其中苹果酸的TAV在有机酸中贡献最大,Glu的TAV在游离氨基酸中贡献最大;3种核苷酸(GMP、IMP、AMP)的TAV均小于1,分别在0.04~0.13、0.01~0.06、0.19~0.46之间,推测可能通过与其它滋味物质协同作用起到增强滋味的效果。此外,随着熟化度的提高,复热后烤鳗鱼的TAV显著增加,且微波复热在全熟时TAV最高(74.73),烤箱复热在七成熟时TAV最高(81.83),侧面说明两种复热方式对不同成熟度样品的滋味活性影响程度不同。该结论明确了烤鳗鱼加工过程中滋味化合物的变化,为保障烤鳗鱼品质的稳定性提供理论参考。

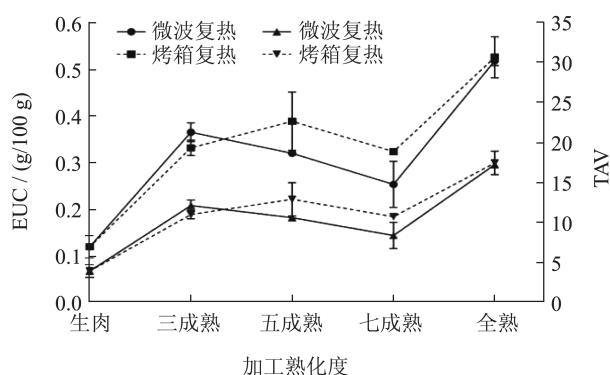


图7 烤鳗鱼 EUC 值及 TAV

Fig.7 EUC value and TAV of roasted eel

游离氨基酸和呈味核苷酸之间的协同效应具有增强鲜味的作用,可以用味精当量(EUC)值来评价,如用于鲜味氨基酸 Asp、Glu 和呈味核苷酸 GMP、IMP、AMP 间的协同效应研究,因此 EUC 值被广泛应用于食品的鲜味特征研究^[38]。不同加工熟化度的烤鳗鱼经复热后的 EUC 值如图 7 所示:微波复热的 EUC 值介于 0.12~0.52 g/100 g,烤箱复热介于 0.12~0.53 g/100 g,其中全熟样品复热后的 EUC 值均最高,与游离氨基酸和电子舌检测结果一致;随着加工熟化度的提高,烤箱复热样品的 EUC 值略高于微波复热,表明复热方式对产品的滋味产生了不同程度的影响,与微波复热相比,烤箱复热能更好地增加烤

鳗鱼的鲜味强度;根据 MSG 的阈值 0.03 g/100 g 推算,不同加工熟化度的烤鳗经复热后 EUC 值的 TAV 均远大于 1,证实了烤鳗鱼明显的鲜味特征。

3 结论

本研究以复热后不同加工熟化度的烤鳗鱼为研究对象,分析了烤鳗鱼中的 23 种非挥发性滋味活性物质的变化。与生肉相比,不同加工熟化度的烤鳗鱼经复热后的氯化物、甜菜碱、苹果酸、GMP、IMP、AMP、鲜味氨基酸、甜味氨基酸、苦味氨基酸和总游离氨基酸含量显著增加,乳酸和琥珀酸含量降低;电子舌对其滋味轮廓的评价结果表明,鲜味、咸味和复合味是烤鳗鱼关键滋味特征,且两种复热方式的滋味属性具有一定的相似度,与游离氨基酸、氯化物和甜菜碱趋势一致;TAV 结果明确了氯化物、苹果酸、乳酸、琥珀酸、Glu 和 His 是烤鳗鱼的 6 种关键滋味活性物质(TAV>1),但 3 种核苷酸(GMP、IMP、AMP)对滋味贡献不大(TAV<1),同时确定了微波和烤箱复热方式分别在全熟(74.73)和七成熟时(81.83)烤鳗鱼的滋味活性更强;EUC 值结果表明复热方式对产品的滋味产生了一定的影响,其中发现烤箱复热能更好地增强烤鳗鱼的鲜味强度。此外,不同加工熟化度的烤鳗经复热后 EUC 值的 TAV 远大于 1,进一步表明烤鳗鱼具有明显的鲜味特征,其中全熟时的滋味活性和鲜味贡献更强(分别为 0.52 g/100 g、0.53 g/100 g)。因此,为保持和提升烤鳗鱼的滋味品质,建议烤鳗鱼熟化度应在七成熟到全熟之间,且烤箱复热效果最佳。本研究以终端产品的角度,深入探讨了烤鳗鱼经复热后的特征滋味轮廓和关键滋味物质,为烤鳗鱼加工过程中滋味调控提供一定的理论依据。

参考文献

- [1] HUANG X H, LUO Y, ZHU X H, et al. Dynamic release and perception of key odorants in grilled eel during chewing [J]. Food Chemistry, 2022, 378: 132073.
- [2] 刘巧鸿.冷冻烤鳗的加工及质量管理[J].海峡科学,2017,4:32-33, 67.
- [3] 尹乐.烤鳗加工条件下胶原蛋白结构变化与品质功能调控机制[D].福建:福州大学,2018.
- [4] SU-IN H, EUN-JUNG L, GEUN-PYO H. Effects of temperature and time on the cookery properties of sous-vide processed pork loin [J]. Food Science of Animal Resources, 2019, 39(1): 65-72.
- [5] LUO J, FRANK D, ARCOT J. Creating alternative seafood flavour from non-animal ingredients: A review of key flavour molecules relevant to seafood [J]. Food Chemistry: X, 2024, 22: 101400.
- [6] DUPPETI H, MANJABHATTA S N, MARTIN A, et al. Effects of different processing methods on the biochemical composition,

- color and non-volatile taste active compounds of whiteleg shrimp (*Litopenaeus vannamei*) [J]. Food Chemistry Advances, 2022, 1: 100118.
- [7] ZHUANG K, WU N, WANG X, et al. Effects of 3 feeding modes on the volatile and nonvolatile compounds in the edible tissues of female Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. Journal of Food Science, 2016, 81(4): S968-S981.
- [8] 崔妍春,张化贤,王爱辉,等.三种贝类蒸煮液主要滋味化合物的分析与比较[J].中国调味品,2022,47(1):1-7.
- [9] 张宁龙.养殖河鲀鱼特征性滋味组分及呈味肽的研究[D].上海:上海海洋大学,2019.
- [10] 黄煜燃,汪薇,赵文红,等.不同鲜味物质对干腌马鲛鱼鲜味的贡献与比较分析[J].食品科学,2021,42(16):138-144.
- [11] ZHANG J, LIU Z, HU Y, et al. Effect of sucrose on the generation of free amino acids and biogenic amines in Chinese traditional dry-cured fish during processing and storage [J]. Journal of Food Science and Technology, 2011, 48: 69-75.
- [12] 钟明慧,徐新星,刘康,等.不同蒸制时间下鲟鱼背部肉的滋味特征差异分析[J].食品工业科技,2021,42(14):55-60.
- [13] 王雪峰,李春萍,吴佳佳,等.臭鳊鱼发酵中滋味成分的鉴定与分析[J].中国食品学报,2015,15(1):222-229.
- [14] HUANG X H, ZHENG X, CHEN Z H, et al. Fresh and grilled eel volatile fingerprinting by e-Nose, GC-O, GC-MS and GC×GC-QTOF combined with purge and trap and solvent-assisted flavor evaporation [J]. Food Research International, 2019, 115: 32-43.
- [15] 孙付万.鲢鱼预制菜研制及贮藏期品质特性研究[D].天津:天津科技大学,2022.
- [16] 黄佳,倪呈,贾洪峰,等.煎制成熟度对牛排挥发性风味物质及感官的影响[J].食品与发酵工业,2024,50(5):305-316.
- [17] 阮秋凤.鱼糜及鱼糜制品的特征风味成分与指纹图谱[D].武汉:华中农业大学,2022.
- [18] CHEN D-W, ZHANG M. Non-volatile taste active compounds in the meat of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. Food Chemistry, 2007, 104(3): 1200-1205.
- [19] YU D, XU Y, REGENSTEIN J M, et al. The effects of edible chitosan-based coatings on flavor quality of raw grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) fillets during refrigerated storage [J]. Food Chemistry, 2018, 242: 412-420.
- [20] 高可安,钟湘,蓝曼宁,等.冻藏对鱼糜熟化过程中品质变化的影响[J].食品科技,2023,48(12):104-112.
- [21] WEI L, DAI K, QIAO Z, et al. Comparative analysis of nutritional and non-volatile taste components of the Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 133: 106373.
- [22] ZONGBAO S, HAODONG P, MIN Z, et al. Non-destructive assessment of equivalent umami concentrations in salmon using hyperspectral imaging technology combined with multivariate algorithms [J]. Spectrochimica acta Part A, Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2022, 285: 121890.
- [23] 池岸英,吉宏武,高加龙,等.加热方式对凡纳滨对虾滋味成分的影响[J].现代食品科技,2012,28(7):776-779,48.
- [24] 盖圣美,顾明月,崔晓莹,等.循环补盐对德州扒鸡盐分变化规律的影响[J].肉类研究,2019,33(6):19-24.
- [25] 常荣.发酵方式保藏酸肉食用品质的变化及食用价值评估[D].重庆:西南大学,2019.
- [26] 徐靖彤.蒸煮热处理技术对鲢鱼肉品质的影响研究[D].杭州:浙江工业大学,2016.
- [27] LIU C, JI W, JIANG H, et al. Comparison of biochemical composition and non-volatile taste active compounds in raw, high hydrostatic pressure-treated and steamed oysters *Crassostrea hongkongensis* [J]. Food Chemistry, 2021, 344: 128632.
- [28] 杨要芳,王治军,宋春勇,等.热风干制对牡蛎特征风味的影响[J].食品与发酵工业,2025,51(7):316-326.
- [29] S J C E, M J F, E L C. Betalains and their applications in food: The current state of processing, stability and future opportunities in the industry [J]. Food Chemistry: Molecular Sciences, 2022, 4(prepublish): 100089.
- [30] SHI J, XIAO N, YIN M, et al. Comparison of non-volatile compounds of *Penaeus vannamei* with different drying treatments via multidimensional infrared spectroscopy [J]. Food Chemistry, 2024, 458: 140233.
- [31] ZHANG R, QIU W, ZHANG M, et al. Effects of different heating methods on the contents of nucleotides and related compounds in minced Pacific white shrimp and Antarctic krill [J]. LWT, 2018, 87: 142-150.
- [32] 黄海源.青鱼半干制品加工工艺及其贮藏过程中品质变化的研究[D].上海:上海海洋大学,2021.
- [33] 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: 39-47.
- [34] LIU Y, HUANG F, YANG H, et al. Effects of preservation methods on amino acids and 5'-nucleotides of *Agaricus bisporus* mushrooms [J]. Food Chemistry, 2014, 149: 221-225.
- [35] 包秀婧,刘新宇,辛广,等.变温压差膨化干燥对秀珍菇鲜香味的影响[J].食品科学,2019,40(22):243-248.
- [36] 卢忆,杜新,戴瑞彤.欧姆加热与水浴加热对羊肉糜滋味物质及游离脂肪酸的影响[J].现代食品科技,2015,31(12):362-369,405.
- [37] 李珊慧,林登峰,赵洪雷,等.双响应值联合优化超声波辅助熬制雪菜大黄鱼汤工艺及其滋味评价[J].中国调味品,2024,49(6):43-49,76.
- [38] YAMAGUCHI S, YOSHIKAWA T, IKEDA S, et al. Measurement of the relative taste intensity of some l- α -amino acids and 5'-nucleotides [J]. Journal of Food Science, 1971, 36(6): 846-849.
- [39] WANG Y, GUI X, JIA M, et al. Effect of different drying methods on the quality characteristics and non-volatile taste compounds of *Hypsizygus marmoreus pileus* and stipe [J]. LWT, 2024, 192: 115685.
- [40] YAO J, ZHAO W, BAI X, et al. Non-volatile taste active compounds in the meat of river snail (*Sinotaia quadrata*) determined by ¹H NMR, e-tongue and sensory analysis [J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2023, 34: 100803.