

微波熬制对鳕鱼汤风味物质释放规律的影响

张朝敏¹ 李鑫晰^{2,3} 冯建慧⁴ 徐永霞^{2,3}

(1. 山西工商学院健康管理学院, 山西 太原 030000; 2. 渤海大学食品科学与工程学院, 辽宁 锦州 121013;
3. 生鲜农产品贮藏加工及安全控制技术国家地方联合工程研究中心, 辽宁 锦州 121013;
4. 烟台大学生命科学学院, 山东 烟台 264005)

摘要: [目的] 以鳕鱼为主要原料, 通过微波加热的方式熬制鳕鱼汤, 同时以传统熬制方式作为对照组, 对比分析微波熬制对鳕鱼汤风味物质释放规律的影响。[方法] 鳕鱼汤经过不同熬制时间(15, 30, 45, 60 min)加工后, 进行感官评价并分析鱼汤中三氯乙酸(TCA)—可溶性肽、氨基酸态氮、呈味核苷酸、有机酸、无机盐离子、游离氨基酸含量的变化。[结果] TCA-可溶性肽、氨基酸态氮、呈味核苷酸、有机酸、无机盐离子(Na^+ 、 K^+ 、 PO_4^{3-} 、 Cl^-)含量均随熬制时间的延长呈上升趋势, 且微波熬制 60 min 的显著高于传统熬制 60 min 的($P < 0.05$); 感官评分、呈味核苷酸、有机酸总量和游离氨基酸总量在微波熬制 60 min 时达最高; 电子鼻与电子舌能够较好地区分两种熬制方式的鱼汤; 通过 GC-MS 共检出 80 种挥发性物质, 其中醛类、酯类、酮类物质是影响鱼汤风味的主要差异物质; 微波加热的方式能促进醛类、酮类、酯类和部分醇类物质的生成。[结论] 微波熬制方式更有利于鳕鱼汤滋味化合物和挥发性风味物质的生成, 对鱼汤整体滋味轮廓有显著贡献。

关键词: 鳕鱼; 鱼汤; 熬制; 微波加工; 风味物质

Effects of microwave decocting on release law of flavor substances in cod soup

Zhang Chaomin¹ Li Xinxi^{2,3} Feng Jianhui⁴ Xu Yongxia^{2,3}

(1. College of Health Management, Shanxi Technology and Business University, Taiyuan, Shanxi 030000, China;
2. College of Food Science and Engineering, Bohai University, Jinzhou, Liaoning 121013, China;
3. National & Local Joint Engineering Research Center of Storage, Processing and Safety Control Technology for Fresh Agricultural and Aquatic Products, Jinzhou, Liaoning 121013, China;
4. College of Life Sciences, Yantai University, Yantai, Shandong 264005, China)

Abstract: [Objective] To prepare cod soup using cod as the main raw material by microwave heating, with traditional boiling as the control, and to compare and analyze the effects of microwave decocting on the release law of flavor substances in cod soup. [Methods] Cod soup was processed at different durations (15, 30, 45, and 60 min), followed by sensory evaluation. The changes in the contents of trichloroacetic acid (TCA)-soluble peptides, amino acid nitrogen, flavor nucleotides, organic acids, inorganic salt ions, and free amino acids in the soup were analyzed. [Results] The contents of TCA-soluble peptides, amino acid nitrogen, flavor nucleotides, organic acids, and inorganic salt ions (Na^+ , K^+ , PO_4^{3-} , and Cl^-) all increased with the extension of decocting time, and were significantly higher in the microwave decocting group at 60 min than in the traditionally boiled group at 60 min ($P < 0.05$). The sensory score, total flavor nucleotides, total organic acids, and total free amino acids all reached their highest values at 60 min of microwave decocting. The electronic nose and electronic tongue effectively distinguished the soups prepared by the two boiling methods. A total of 80 volatile compounds were identified

基金项目: 山西工商学院案例研发项目(编号: 2025A2005)

通信作者: 徐永霞(1983—), 女, 渤海大学教授, 博士。E-mail: xuyx1009@126.com

收稿日期: 2025-10-24 改回日期: 2026-04-03

引用格式: 张朝敏, 李鑫晰, 冯建慧, 等. 微波熬制对鳕鱼汤风味物质释放规律的影响[J]. 食品与机械, 2026, 42(9): 19-29.

Citation: Zhang Chaomin, Li Xinxi, Feng Jianhui, et al. Effects of microwave decocting on release law of flavor substances in cod soup[J]. Food & Machinery, 2026, 42(9): 19-29.

by GC-MS, among which aldehydes, esters, and ketones were the main contributors to flavor differences. Microwave heating promoted the formation of aromatic aldehydes, ketones, esters, and some alcohols. [Conclusion] Microwave decocting is more conducive to the increase of taste compounds and volatile flavor substances in cod soup, and makes a significant contribution to the overall flavor profile of the soup.

Keywords: cod; fish soup; decocting; microwave processing; flavor substance

鳕鱼属优质深海鱼类,狭鳕鱼为其主要品种之一^[1]。狭鳕鱼个体质量可达 11.5 kg,全球年捕捞量在 300 万 t 左右^[2]。其肉质细嫩,含有丰富的营养物质,具有高蛋白、低脂肪、低胆固醇的特点,被西方人誉为“餐桌上的营养师”^[3-4]。鳕鱼除鲜销外主要用于生产鱼糜或冷冻鳕鱼片等产品。中国部分居民也喜爱用鳕鱼来熬汤^[5-6],该鱼汤因其鲜美的味道和丰富的营养成分备受人们喜爱^[7]。鱼汤在熬制过程中的水溶性蛋白质、脂肪、糖类等物质不断溶出并发生各种物理化学反应,使鱼汤呈现不同的气味、滋味、色泽^[8-9]。鱼汤的风味及口感除所选原料鱼本身的特性影响外,还受外源添加物如调味剂食盐、醋、料酒的影响,此外烹煮方式也会影响鱼汤中风味物质的释放和营养成分的溶出^[10]。

汤的熬制方式多种多样,常见的有常压熬制和高压熬制两种。其中,常压传统熬制耗费时间长,能耗较高;高压熬制虽然有利于营养物质的溶出,节约烹饪时间,但会导致汤的颜色与风味变差,此外,微波技术的传热效率高,操作简便,且有利于汤的整体适口性^[11]。赵钜阳等^[12]研究发现,在微波功率 720 W,微波时间 60 min 时,大马哈鱼汤拥有较好的风味及营养价值。韩忠等^[13]探究了微波对天麻鱼头汤营养和安全性的影响,发现微波熬制有助于氨基酸、天麻素等小分子物质的溶出。但目前关于鳕鱼汤熬制过程中风味物质释放规律及其分子机制研究较少。试验拟以鳕鱼为原料,探究微波熬制与传统熬制鳕鱼汤的风味物质变化规律,为后续预制鱼汤及海鲜调味料等产品的开发提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

冷冻狭鳕鱼:尾长 60~70 cm,市售;
海天精制料酒:海天醋业集团有限公司;
氯化钾、酒石酸、酒石酸钾钠、氢氧化钠、氢氧化钾、磷酸二氢钾、高氯酸、40% 甲醛溶液、硫酸铜、甲醇、碳酸钠等:分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

1.2 仪器与设备

不锈钢汤锅:ST22Z1 型,浙江苏泊尔股份有限公司;
电磁炉:C22-WT2203 型,广州美的生活电器制造有限公司;
美的微波炉:M1-L201B 型,上海美的厨房电器制造有限公司;

电子鼻:PEN3 型,德国 AIRSENSE 公司;
电子舌:SA-402B 型,日本 insent 公司;
气质联用仪:7890A/5975C 型,美国 Agilent 公司;
分析天平:MP6001 型,上海舜宇恒平科学仪器;
高速冷冻离心机:DK-8D 型,美国 Agilent 公司;
高效液相色谱仪:Agilent1200 型,美国 Agilent 公司;
紫外分光光度计:UV2550 型,日本岛津公司;
高速分散器:XHF-DY 型,宁波新芝生物科技股份有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 鱼汤制备 鳕鱼流水解冻去除头和内脏,洗净并分成 2 cm×2 cm×2 cm 的块状。称取 (270.0±2.0) g 鳕鱼块,按质量比 20:1 加入料酒腌制 20 min,平底锅中加入 10 mL 大豆油将鱼块煎至两面金黄,盛入玻璃碗内,加入鳕鱼质量 3 倍的蒸馏水。相同操作制作两份,取其中一份放入微波炉,以功率 500 W 熬制 60 min。另一份放入不锈钢汤锅内,大火煮开调至最小火,锅沸计时 60 min。

1.3.2 感官评价 选取食品专业感官评价经验丰富的研究生 8 人(4 女 4 男)组成感官评价小组,按表 1 对鱼汤样品的气味、鲜味和苦味进行感官评价。

表 1 感官评分标准			
Table 1 Standards for sensory evaluation			
项目	权重	标准	分值
气味	0.2	香味浓郁,无异味	7~10
		轻微香味,无异味	4~6
		无香味或有异味	1~3
鲜味	0.5	鲜味浓郁	7~10
		鲜味稍淡	4~6
		几乎无鲜味	1~3
苦味	0.3	滋味醇厚,无苦味	7~10
		滋味适中,稍有苦味	4~6
		苦味明显	1~3

1.3.3 三氯乙酸(TCA)—可溶性肽和氨基酸态氮测定
准确量取 3.0 mL 鱼汤样品,加入 27 mL 5% 三氯乙酸溶液,均质,4 ℃静置 60 min,取上清液采用 Lowry 法测定可溶性肽含量^[14]。按 GB 5009.235—2016 测定氨基酸态氮含量。

1.3.4 电子舌分析 准确量取 10.0 mL 鱼汤样品,10 倍稀

释后,使用孔径 0.45, 0.22 μm 滤膜过滤,依次用电子舌进行检测。每组样品做 3 次平行。

1.3.5 呈味核苷酸测定 参照 Pei 等^[15]的方法并稍作修改。准确量取 5.0 mL 鱼汤样品,加入 15 mL 高氯酸(5%),均质,4 $^{\circ}\text{C}$ 、7 000 r/min 离心 10 min,取沉淀重复上述操作,合并两次上清液,用 KOH 溶液(5 mol/L)调节 pH 至 6.75,定容,取 1 mL 上清液,过 0.22 μm 滤膜后进行高效液相色谱分析。

1.3.6 有机酸测定 参照 Kong 等^[16]的方法并稍作修改。准确称量 5.0 mL 鱼汤样品,加入 0.25 mL 高氯酸(5%),匀浆后静置 20 min,7 000 r/min 离心 10 min,取 1 mL 上清液,过 0.22 μm 滤膜后进行高效液相色谱分析。

1.3.7 无机盐离子测定 根据 AOAC 标准法。

1.3.8 游离氨基酸测定 参照 Kong 等^[17]的方法。

1.3.9 电子鼻分析 准确称取 5.0 g 鱼汤样品,用保鲜膜密封 3 层,室温静置 30 min,采用电子鼻进行检测,每个样品做 3 次平行。检测 120 s,清洗 120 s,顶空温度 23 $^{\circ}\text{C}$,选取 115~120 s 数据进行分析。

1.3.10 GC-MS 分析 准确量取 8.0 mL 鱼汤样品于顶空瓶中,加入 2 μL 环己酮(0.473 mg/mL),60 $^{\circ}\text{C}$ 平衡 15 min,

用活化好的 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头顶空吸附 30 min,解吸 5 min。GC 条件:进样口温度 250 $^{\circ}\text{C}$;不分流模式进样;氦气流速 1.0 mL/min;柱初温 40 $^{\circ}\text{C}$ 保持 30 min,以 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 100 $^{\circ}\text{C}$,再以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 升至 230 $^{\circ}\text{C}$,保持 5 min。MS 条件:接口温度 280 $^{\circ}\text{C}$;离子源温度 230 $^{\circ}\text{C}$;离子化方式 EI,电子能量 70 eV;质量扫描范围 30~550(m/z)。

1.3.11 数据分析 试验结果以平均值 $\pm$ 标准偏差表示,采用 SPSS 19.0 软件进行显著性比较分析,采用 Origin 9.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 感官评价

由表 2 可知,随着加热时间的延长,微波熬制和传统熬制在气味、鲜味和苦味 3 个方面的分值呈现不同程度的上升趋势。这是因为加热时间延长,鱼肉中蛋白质、糖类等大分子物质不断降解,形成多肽、氨基酸、核苷酸等多种呈味小分子物质,使鱼汤逐渐变得香味浓郁和滋味鲜美。微波熬制 60 min 时,感官评分达到最大值 9.03,可能是由于长时间高速高频变化的电磁作用,肌细胞破坏程度大,呈味小分子物质溶出较多。

表 2 感官评分表[†]
Table 2 Sensory score

熬制方式	熬制时间/min	气味	鲜味	苦味	总分
传统熬制	15	1.17 $\pm$ 0.35 ^e	1.83 $\pm$ 0.41 ^d	1.83 $\pm$ 0.41 ^d	1.70
	30	3.00 $\pm$ 0.30 ^d	3.17 $\pm$ 0.24 ^c	2.50 $\pm$ 0.61 ^d	2.93
	45	6.83 $\pm$ 0.11 ^c	6.17 $\pm$ 0.12 ^b	6.67 $\pm$ 0.18 ^c	6.45
	60	7.83 $\pm$ 0.17 ^{bc}	7.17 $\pm$ 0.14 ^b	7.67 $\pm$ 0.16 ^{bc}	7.45
微波熬制	15	2.50 $\pm$ 0.42 ^d	2.17 $\pm$ 0.35 ^{cd}	2.50 $\pm$ 0.33 ^d	2.33
	30	7.00 $\pm$ 0.20 ^c	7.00 $\pm$ 0.13 ^b	7.00 $\pm$ 0.13 ^c	7.00
	45	8.17 $\pm$ 0.09 ^{ab}	8.33 $\pm$ 0.10 ^a	8.50 $\pm$ 0.06 ^{ab}	8.35
	60	9.17 $\pm$ 0.04 ^a	9.00 $\pm$ 0.14 ^a	9.00 $\pm$ 0.10 ^a	9.03

[†] 同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

2.2 TCA-可溶性肽和氨基酸态氮含量

多肽类和氨基酸类物质对鱼汤滋味有重要的影响,二者的含量是评价鱼汤品质的重要指标。由图 1 可知,随着熬制时间的延长,TCA-可溶性肽含量和氨基酸态氮含量均逐渐上升,当熬制时间为 60 min 时,微波熬制的 TCA-可溶性肽和氨基酸态氮含量分别达到最大值。随着熬制时间的延长,水温逐渐升高,鱼肉组织变得松散,其中的糖类和蛋白质逐步溶出和降解,继续加热,肌纤维束裂解,肌细胞破裂,使得营养物质进一步溶出和降解,汤中的粗蛋白和水溶性蛋白含量逐步增加,生成的可溶性活性肽和氨基酸含量不断增加,这些溶出和降解的产物赋予了鱼汤良好的风味特征^[18]。微波熬制 60 min 时,

TCA-可溶性肽含量和氨基酸态氮含量均显著高于传统熬制组和其他微波组($P<0.05$),可能是在长时间高频变化的电磁作用下,内部分子高频往复运动,微波的介电加热效应使分子极化和摩擦生热,导致鱼肉组织被破坏程度较大,肌细胞破裂程度较高,加大了蛋白质等大分子物质的溶出和降解^[19]。因此,微波熬制更有利于鳕鱼汤中 TCA-可溶性肽和氨基酸态氮含量的增加。

2.3 电子舌

电子舌是通过模拟人体味觉细胞工作的一类分析检测技术,与感官评价相比能够更加数字化、客观地评价样品的味觉特征^[20]。经前期分析处理,酸味、咸味、涩味和回味均在零点以下,因此以苦味、鲜味、丰富性三者作为

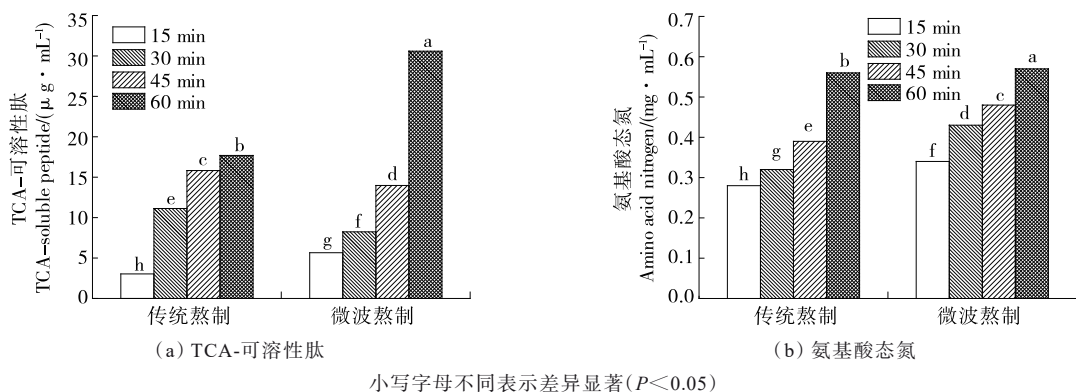


图 1 熬制方式对鱼汤 TCA-可溶性肽和氨基酸态氮含量的影响

Figure 1 Effects of decocting methods on TCA-soluble peptide and amino acid nitrogen contents of cod soup

主要味觉响应值。

由图 2(a)可知,随熬制时间的延长,鱼汤的鲜味逐渐增加,且微波熬制组高于传统熬制组。微波熬制 60 min 时,鱼汤的苦味显著高于传统熬制组和其他微波组 ($P < 0.05$),这可能是随着熬制时间的延长,鱼汤中苦味肽和一些疏水性氨基酸的溶出也相应增加,使鱼汤的苦味强度增加^[21]。微波熬制 60 min 时鱼汤的丰富性最强,且显著高于传统熬制组和其他微波组 ($P < 0.05$),这与苦味和鲜味的测定结果相呼应。微波熬制 60 min 时,鱼汤苦味不明显,可能是因为多种滋味物质复合叠加的效果。综上,

微波熬制能有效增强鳕鱼汤滋味物质的溶出,提高滋味丰富性。

电子舌 PCA 可通过划分区域来表明各样品之间的差异,不同样品之间的距离越大,差异性也越大^[22]。由图 2(b)可知,PC1 和 PC2 分别为 91.07% 和 5.42%,二者总贡献率之和为 96.49%,说明 PC1 和 PC2 可有效反映不同熬制时间段的鳕鱼汤主要滋味特征。微波熬制 60 min 样品在第三象限且与其他几组样品相距较远,说明其与其他样品的滋味物质差异较大。各样品之间相互独立,互不重叠,说明微波熬制可改变鳕鱼汤中的滋味物质。

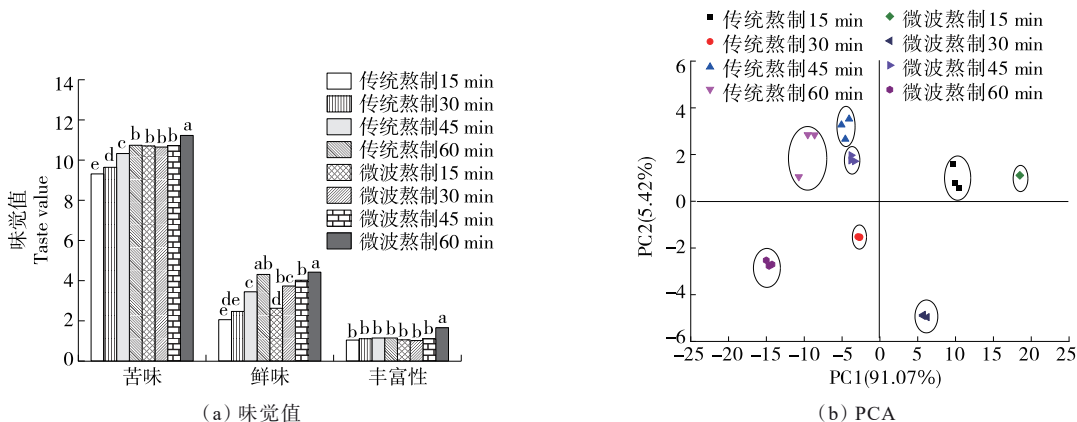


图 2 电子舌主要味觉值和 PCA 分析图

Figure 2 Main taste values and PCA of the electronic tongue

2.4 呈味核苷酸

鱼类死后,体内 ATP 发生降解,一般认为降解途径为 $ATP \rightarrow ADP \rightarrow AMP \rightarrow IMP$,GMP 是 IMP 的转化产物。其中 AMP 和 IMP 是主要的呈味核苷酸,对鱼肉滋味的形成有重要贡献^[23]。5'-单磷酸鸟苷 (GMP)、5'-单磷酸肌苷 (IMP) 和 5'-单磷酸腺苷 (AMP) 3 种物质均属于鲜味核苷酸,其中 5'-AMP 的增鲜效果远不及 5'-GMP 和 5'-IMP^[24]。5'-IMP 单独存在时不具鲜味,与 5'-AMP 协同作用可对鲜

味产生很大贡献^[25]。

由表 3 可知,5'-IMP 均为最主要的呈味核苷酸,与尹方帅等^[26]的研究结果一致。随着加热时间的延长,鳕鱼汤中 5'-核苷酸总量均呈上升趋势,使鱼汤鲜味增加。由于长时间的高温处理促进了 ATP 的降解,产生的 AMP 继续降解进一步产生 IMP,IMP 产生速度大于降解速度时会出现 IMP 积累。对比相同熬制时间,微波熬制的核苷酸总量高于传统熬制的,微波熬制 60 min 时核苷酸总量达

表3 熬制方式对鱼汤呈味核苷酸含量的影响[†]

Table 3 Effect of decocting methods on flavor nucleotide content of cod soup

熬制方式	熬制时间/min	5'-GMP/ (10^{-2} mg·mL ⁻¹)	5'-IMP/ (10^{-2} mg·mL ⁻¹)	5'-AMP/ (10^{-2} mg·mL ⁻¹)	总量/ (10^{-2} mg·mL ⁻¹)
传统熬制	15	5.01±0.03 ^d	9.05±0.30 ^d	4.04±0.08 ^d	18.10±0.34 ^h
	30	5.98±0.03 ^c	9.56±0.33 ^d	5.20±0.34 ^c	20.74±0.54 ^f
	45	6.99±0.12 ^b	12.81±0.02 ^b	10.64±0.13 ^b	30.44±0.12 ^d
	60	8.17±0.34 ^a	19.26±0.03 ^a	12.69±0.03 ^a	40.12±0.23 ^b
微波熬制	15	5.76±0.13 ^d	9.68±0.03 ^d	4.32±0.07 ^d	19.76±0.36 ^g
	30	6.56±0.30 ^c	10.59±0.46 ^c	6.46±0.49 ^c	23.61±0.22 ^c
	45	7.60±0.34 ^b	15.37±0.17 ^b	11.43±0.28 ^b	34.40±0.44 ^c
	60	9.17±0.14 ^a	23.54±0.20 ^a	14.37±0.05 ^a	47.08±0.67 ^a

† 同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

到最大值,显著高于传统熬制组和其他微波组($P<0.05$),说明微波的介电加热效应导致分子极化和摩擦生热,鱼肉组织破坏性强,能进一步加速ATP的降解,产生较多的鲜味物质,增强鳕鱼汤的呈鲜效果。

2.5 有机酸

有机酸在海产品中有着广泛的分布,由糖酵解途径产生,可与核苷酸类、氨基酸类物质通过协同作用为海产品增加滋味特征^[27]。由表4可知,鱼汤中共检出乳酸和琥珀酸2种有机酸。琥珀酸和乳酸均为海产品中重要的有机酸类物质,琥珀酸是海鲜中鲜味物质的主要来源,乳酸对鲜味有增强作用^[28]。随着熬制时间的延长,鱼汤中有机酸总量均呈上升趋势。微波熬制的有机酸总量均显著高于传统熬制的($P<0.05$),微波熬制60 min时,有机酸含量高达25.02 mg/100 mL,可能是微波熬制过程中,内部分子高频往复运动的产热方式对鱼肉组织造成的破坏性强,细胞破裂程度高,促进了有机酸的释放,从而增强了鳕鱼汤的鲜味。

2.6 无机盐离子

Na^+ 、 K^+ 、 PO_4^{3-} 和 Cl^- 是海产品中重要的无机盐离子,与滋味评价密切相关^[29]。翁世兵等^[30]研究表明,缺少 Na^+ 和 Cl^- ,盲蛛雪蟹肉的甜味、鲜味和特征风味明显降低, K^+ 、 PO_4^{3-} 也对蟹肉的整体风味起到提升作用。由表5可知,在两种方式熬制的鱼汤中检测到 Na^+ 、 K^+ 、 PO_4^{3-} (以P元素计)和 Cl^- 4种离子,其含量均随时间的延长而上升。微波熬制60 min时,4种无机盐离子含量均显著高于传统熬制组和其他微波组($P<0.05$),可能是长时间微波熬制改变了鱼肉细胞膜渗透性,导致细胞膜出现击穿性破裂,使细胞内含无机离子的体液漏出体外^[31]。说明微波熬制能够促进无机盐离子的释放,进而提高鱼汤的整体滋味。

2.7 游离氨基酸

鱼汤的滋味特性与气味特性都是评价鱼汤整体风味品质的重要因素,氨基酸是人体所必需的营养物质之一,也是鱼汤的主要滋味来源之一。Chiou等^[32]研究发现,菲

表4 微波熬制方式对鱼汤有机酸含量的影响[†]

Table 4 Effect of decocting methods on organic acid content of cod soup

熬制方式	熬制时间/min	乳酸/ (10^{-2} mg·mL ⁻¹)	琥珀酸/ (10^{-2} mg·mL ⁻¹)	总量/ (10^{-2} mg·mL ⁻¹)
传统熬制	15	0.71±0.54 ^d	1.62±0.05 ^d	2.33±0.20 ^h
	30	2.00±0.08 ^c	4.56±0.09 ^c	6.56±0.45 ^f
	45	3.62±0.09 ^b	7.74±0.06 ^b	11.36±0.44 ^d
	60	6.45±0.09 ^a	13.76±0.41 ^a	20.21±0.65 ^b
微波熬制	15	1.57±0.12 ^d	2.94±0.24 ^d	4.51±0.09 ^g
	30	3.03±0.35 ^c	4.86±0.13 ^c	7.89±0.21 ^e
	45	4.82±0.49 ^b	8.42±0.43 ^b	13.24±0.66 ^c
	60	8.49±0.30 ^a	16.53±1.06 ^a	25.02±0.88 ^a

† 同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

表 5 熬制方式对鱼汤无机盐离子含量的影响[†]

Table 5 Effect of decocting methods on inorganic salt ion content of cod soup					
熬制方式	熬制时间/min	Cl/(mg·L ⁻¹)	K/(mg·L ⁻¹)	P/(mg·L ⁻¹)	Na/(mg·L ⁻¹)
传统熬制	15	3 830±54 ^f	444±11 ^g	215±2 ^g	2 370±11 ^f
	30	3 840±40 ^f	475±12 ^f	221±4 ^f	2 280±11 ^h
	45	4 420±39 ^d	761±9 ^e	342±4 ^e	2 990±4 ^e
	60	4 920±42 ^b	824±6 ^b	385±3 ^b	3 230±6 ^b
微波熬制	15	3 610±16 ^g	342±3 ^h	170±7 ^h	2 290±11 ^g
	30	4 210±14 ^e	693±6 ^e	315±7 ^e	2 640±12 ^e
	45	4 610±23 ^e	695±4 ^d	324±8 ^d	2 920±5 ^d
	60	5 000±12 ^a	977±3 ^a	433±6 ^a	3 630±8 ^a

[†] 同列小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

律宾蛤仔的特征风味由谷氨酸、精氨酸、甘氨酸与 5'-AMP、牛磺酸、Na⁺、Cl⁻ 等成分共同构成。

由表 6 可知,两种方式熬制的鱼汤中均检出 14 种氨基酸。随着熬制时间的延长,氨基酸总量显著增加,微波熬制鱼汤中的氨基酸总量显著高于传统熬制组 ($P<0.05$),说明随着加热时间的延长,蛋白质发生降解产生可溶性肽,进一步降解产生游离氨基酸;微波熬制加大了蛋

白质的降解速率,产生了更多的游离氨基酸。每个组别中甜味氨基酸之和均占总游离氨基酸之和 50% 以上,其中的甘氨酸、丙氨酸和丝氨酸是鱼汤中最主要的游离氨基酸,三者均对鱼汤的甜味有一定的贡献作用,甘氨酸还能够减少口腔中的不愉快口感^[33],微波熬制 60 min 时,甜味氨基酸总量和鲜味氨基酸总量显著高于传统熬制组 ($P<0.05$),其中甘氨酸含量占甜味氨基酸总量的 50% 以

表 6 微波熬制对鱼汤游离氨基酸含量的影响[†]

Table 6 Effect of decocting methods on free amino acid content of cod soup								mg/100 mL
化合物 名称	传统熬制时间/min				微波熬制时间/min			
	15	30	45	60	15	30	45	60
Asp	4.12±0.10 ^d	2.41±0.03 ^f	4.44±0.23 ^{cd}	8.16±0.13 ^a	3.48±0.20 ^e	4.64±0.23 ^c	6.20±0.11 ^b	7.84±0.31 ^a
Glu	9.80±0.24 ^f	8.20±0.12 ^g	16.52±0.33 ^c	18.4±0.23 ^b	7.76±0.45 ^g	11.24±0.21 ^e	15.20±0.19 ^d	24.28±0.21 ^a
Gly	17.04±0.16 ^b	35.88±0.65 ^e	40.40±0.53 ^d	64.00±0.57 ^b	21.92±0.38 ^g	27.56±0.35 ^f	44.00±0.41 ^c	86.80±0.71 ^a
Ser	4.80±0.25 ^f	3.94±0.07 ^h	5.36±0.09 ^e	9.73±0.15 ^a	4.44±0.12 ^g	5.84±0.17 ^d	7.44±0.23 ^c	8.40±0.18 ^b
Pro	1.46±0.03 ^b	3.87±0.12 ^f	4.92±0.05 ^e	20.40±0.22 ^a	1.74±0.02 ^g	4.88±0.12 ^d	8.16±0.13 ^b	4.52±0.14 ^e
Ala	11.88±0.43 ^g	19.36±0.25 ^e	34.84±0.16 ^c	41.60±0.18 ^b	14.00±0.34 ^f	23.88±0.32 ^d	34.56±0.34 ^c	51.20±0.22 ^a
Thr	4.64±0.20 ^f	4.28±0.11 ^g	5.48±0.15 ^d	9.16±0.13 ^a	4.16±0.09 ^g	5.20±0.09 ^e	6.96±0.23 ^c	8.88±0.22 ^b
His	4.24±0.07 ^e	2.83±0.07 ^h	6.08±0.09 ^c	7.28±0.14 ^b	3.33±0.15 ^g	5.16±0.14 ^d	3.95±0.14 ^f	7.36±0.15 ^a
Lie	1.81±0.09 ^f	1.64±0.05 ^g	2.58±0.11 ^d	3.78±0.17 ^b	1.59±0.06 ^g	1.94±0.07 ^e	2.94±0.06 ^c	4.04±0.06 ^a
Leu	2.17±0.08 ^e	1.79±0.07 ^f	3.42±0.05 ^e	6.48±0.13 ^a	1.56±0.07 ^g	2.53±0.06 ^d	4.76±0.08 ^b	6.48±0.15 ^a
Lys	1.07±0.02 ^e	1.20±0.05 ^d	2.79±0.12 ^a	2.52±0.11 ^b	0.36±0.05 ^f	0.98±0.07 ^e	2.19±0.06 ^c	2.19±0.04 ^e
Val	2.88±0.16 ^e	2.45±0.09 ^f	4.08±0.09 ^d	6.08±0.21 ^b	2.54±0.21 ^f	3.03±0.05 ^e	4.80±0.03 ^c	6.68±0.15 ^a
Arg	1.43±0.08 ^e	1.49±0.07 ^e	1.80±0.08 ^d	3.66±0.23 ^a	1.79±0.05 ^d	1.90±0.08 ^d	2.77±0.09 ^d	2.54±0.07 ^e
Tyr	1.99±0.03 ^e	1.67±0.05 ^f	2.78±0.12 ^c	4.56±0.12 ^a	1.54±0.07 ^f	2.22±0.06 ^d	3.43±0.08 ^b	4.60±0.28 ^a
ΣUAA	13.92±0.34 ^e	10.61±0.15 ^g	20.96±0.54 ^e	26.56±0.36 ^b	11.24±0.65 ^f	15.88±0.44 ^d	21.40±0.30 ^c	32.12±0.52 ^a
ΣSAA	39.82±1.10 ^g	67.33±1.20 ^e	91.00±0.98 ^d	144.89±1.25 ^b	46.26±0.80 ^f	67.36±1.05 ^e	108.08±1.60 ^c	159.80±1.47 ^a
ΣBAA	15.59±0.23 ^g	13.07±0.09 ^h	23.53±0.20 ^e	34.36±0.09 ^a	12.71±0.15 ^f	17.76±0.11 ^d	28.27±0.09 ^c	33.89±0.35 ^b
ΣFAA	69.13±3.21 ^h	91.01±6.32 ^f	135.49±9.11 ^d	205.81±4.55 ^b	70.21±3.22 ^g	101.00±5.44 ^e	157.75±3.21 ^c	225.81±3.45 ^a

[†] ΣUAA 为鲜味氨基酸之和;ΣSAA 为甜味氨基酸之和;ΣBAA 为苦味氨基酸之和;ΣFAA 为游离氨基酸之和;同行小写字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

上,对甜味贡献较大。加热过程中苦味氨基酸也相应增加,这与电子舌检测结果一致。其中组氨酸与其他物质协同作用,可使产品具有“肉香味”^[34-35]。综上,与传统熬制相比,微波加热更有利于游离氨基酸的溶出,进而增加鱼汤滋味的丰富性。

2.8 电子鼻

电子鼻通过对特定化合物灵敏的传感器模拟人类的嗅觉,从而对不同的挥发性气体进行分析,被广泛应用于食品分析领域中^[36]。由图3可知,LD1和LD2之和为95.13%,可以很好地反映样品的全部气味信息。两种方式熬制15 min和30 min的样品主要分布在图右侧,熬制45 min和60 min的样品分布在图左侧,说明熬制45 min后主要风味物质发生改变。传统熬制60 min、传统熬制45 min与微波熬制45 min 3组样品分布近且部分重叠,其风味成分相似;微波熬制60 min的样品与其他组的样品相距较远,气味发生了较大改变。因此,微波熬制能够改变鳕鱼汤的特征风味。

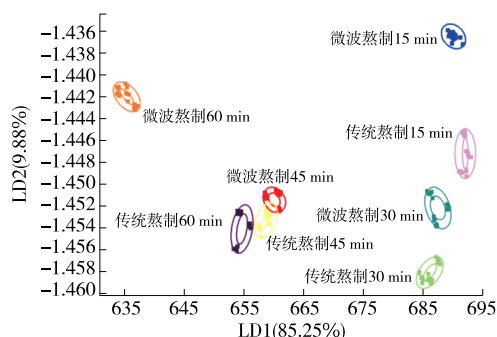


图3 电子鼻LDA分析图

Figure 3 LDA of electronic nose

2.9 GC-MS分析

由表7可知,8组鱼汤中共检出80种挥发性物质,主要包括醛类、酮类、烯烃类、酯类、醇类、烷烃类和其他类。醛类物质是海产品的主要风味特征来源,阈值较低,对鱼汤整体的风味有显著影响^[37]。8组样品中共检出7种醛类物质,为鱼汤中含量最高的一类挥发性物质。戊醛具有水果香,己醛具有青草味、鱼腥味,庚醛和辛醛具有青草味,壬醛具有脂肪味,己醛是鱼类腥味物质的主要来源^[31]。戊醛、己醛、庚醛、辛醛和壬醛含量随着熬制时间的延长呈上升趋势。3-羟基丁醛具有麦芽香气,仅在加热60 min样品中检出,且微波熬制样品中含量较高。微波熬制增加了戊醛、庚醛、3-羟基丁醛等具有果香、青草香和麦芽香气的醛类物质含量,同时也增加了己醛等具有鱼腥味的醛类物质含量,这些物质共同作用影响鱼汤的风味层次,使得微波60 min样品电子鼻LDA结果与其他组别差异较大。

醇、酮类物质阈值较高,对鱼汤主体风味特征贡献较小^[38],具有独特的酒香、果香和花香味。醇类物质一般认为是由脂质氧化以及糖、醛、氨基酸等还原产生^[39],是新鲜贝类的主要挥发性成分。其中,2-乙基己醇含量最高,具有淡花香和甜味,随着熬制时间的延长而增多,微波60 min时含量达到最大值。其次是2-异丙基-5-甲基-1-庚醇。2-丁基辛醇和11-甲基十二醇均随着加热时间的延长而出现,11-甲基十二醇仅在微波熬制60 min时被检出。2-乙基己醇和11-甲基十二醇可能是影响微波熬制60 min样品电子鼻LDA结果与其他组别距离较远的醇类物质。酮类物质形成途径与醛类物质类似,具有特殊的芳香气味,如焦香味、桉叶味、脂肪味^[31]。鱼汤中共检出5种酮类物质,主要检出的酮类物质为2-甲基-4-庚酮和4-甲基-2-庚酮。这5种物质中,有4种物质均随着加热时间的延长而出现,可能与长时间加热鱼肉组织中脂肪氧化、氨基酸降解、美拉德反应的发生有关,4种物质在微波熬制样品中出现时间早于传统熬制组,说明微波熬制的方式能够促进酮类物质的释放。

酯类物质共检出6种,主要由醇类和羧酸类物质通过酯化反应生成,有微弱的酒香味和清香味。8组样品中均检测到了乙酸乙酯和乙二醇月桂酸酯,乙酸乙酯具有芳香气味,且含量随着熬制时间的延长而增加。草酸酰胺乙酯、氨基甲酸甲酯和乙酸月桂酯均随着熬制时间的延长而出现,微波熬制组中3种酯类物质含量均高于传统熬制组,可能是长时间高温加热催化了酯化反应。微波的介电加热效应导致分子极化和摩擦生热的方式,进一步加快了酯化反应,促成了新酯类物质的生成,从而影响鱼汤的风味。

烃类物质阈值较高,对鱼汤的整体风味贡献较小。8组鱼汤中共检出7种烯烃类物质和30种烷烃。1,1-二甲乙基己烷、2,4-二甲基己烷、4-甲基辛烷是鱼汤中主要的烷烃类物质,烷烃和烯烃类物质同时存在可协同作用增加鱼汤的整体风味^[40],3种物质均在微波60 min样品中含量最高。鱼汤内还检出其他类物质21种,如芳香族化合物、酰胺类等,其中对二甲苯、间二甲苯均具有芳香气味,随着熬制时间的延长含量增加,对鱼汤的风味有一定的贡献作用。

综上,对鳕鱼汤整体风味贡献较大的是醛类、酯类和酮类物质,与桂美娇等^[35]的研究结果一致。与传统熬制相比,微波熬制更有助于挥发性香味醛类物质(3-羟基丁醛、戊醛和庚醛等)的释放,促进酮类物质、酯类物质(草酸酰胺乙酯、氨基甲酸甲酯和乙酸月桂酯)和部分醇类物质(11-甲基十二醇)的生成,这些物质共同作用增强了鱼汤风味的丰富性,使汤变得香味浓郁和滋味鲜美。

表 7 微波熬制对鱼汤挥发性成分组成和含量的影响

Table 7 Effect of decocting methods on volatile components and contents of cod soup											μg/L
种类	化合物	保留时间/min	保留指数	传统熬制/min				微波熬制/min			
				15	30	45	60	15	30	45	60
醛类	3-羟基丁醛	3.78	<800	ND	ND	ND	0.88	ND	ND	ND	0.96
	戊醛	5.06	<800	ND	67.88	99.66	109.33	ND	78.44	89.00	110.22
	己醛	5.32	<800	77.52	81.69	141.68	150.26	79.32	82.00	100.45	221.97
	庚醛	9.14	897	93.21	187.16	177.89	198.91	94.02	99.43	186.56	245.88
	辛醛	14.24	1 025	23.22	34.33	45.44	76.33	23.43	29.21	37.45	77.21
	壬醛	19.18	1 076	99.67	123.31	167.99	200.33	100.22	111.22	166.89	233.67
	2-甲基烯醛	7.54	839	ND	ND	ND	1.99	ND	ND	0.76	4.65
酮类	2-甲基-4-庚酮	10.11	887	ND	ND	34.22	78.21	ND	16.44	54.11	99.22
	2-甲基-3-庚酮	10.14	890	ND	ND	19.37	44.22	ND	10.23	23.32	50.22
	2,5-二甲基-3-己酮	10.15	890	ND	ND	ND	4.94	ND	ND	3.22	10.61
	4-甲基-2-庚酮	10.75	896	23.11	34.22	45.22	65.21	23.22	35.21	43.21	83.11
	4,6-二甲基-2-庚酮	13.18	958	ND	ND	14.12	19.65	ND	17.33	33.32	38.33
烯烃类	2,4-二甲基-1-庚烯	6.61	828	17.98	30.21	43.12	46.22	19.78	27.54	47.23	57.18
	双戊烯	14.94	1 032	8.99	9.66	23.33	40.21	10.11	11.33	30.87	53.24
	3,3-二甲基-1-己烯	17.38	1 049	ND	ND	9.07	15.88	ND	5.33	11.33	15.66
	5-十二烯	17.63	1 052	ND	ND	ND	0.94	ND	ND	ND	ND
	十五烯	27.81	1 271	0.22	1.11	2.11	2.54	ND	ND	2.11	3.21
	1-十九碳烯	30.08	1 349	8.99	9.99	13.22	16.77	ND	8.77	10.21	11.32
	1-十六烯	38.11	1 558	6.23	7.72	7.72	10.11	7.00	8.12	8.88	13.21
酯类	草酸酰胺乙酯	2.03	<800	ND	ND	ND	5.66	ND	ND	ND	6.77
	氨基甲酸甲酯	3.46	<800	ND	ND	ND	ND	ND	ND	6.99	9.08
	乙酸乙酯	3.87	<800	11.22	24.28	48.99	63.22	27.89	37.45	50.23	74.23
	1-乙酸二十六烷基酯	11.84	932	ND	ND	ND	0.78	ND	ND	ND	ND
	乙酸月桂酯	24.73	1 271	ND	ND	1.33	3.78	0.98	2.32	2.51	3.90
	乙二醇月桂酸酯	32.19	1 451	2.24	3.88	6.44	9.09	3.76	4.88	5.98	11.09
醇类	2-乙基己醇	15.73	1 005	23.22	34.44	42.88	59.29	25.99	38.98	40.32	60.01
	2-异丙基-5-甲基-1-庚醇	23.24	1 180	7.99	8.01	13.21	21.09	7.21	8.00	17.21	20.99
	11-甲基十二醇	27.91	1 273	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	7.38
	2-丁基辛醇	31.44	1 444	ND	ND	9.77	17.99	ND	8.01	16.22	18.09
烷烃类	羟甲基环丙烷	3.03	<800	ND	ND	ND	0.87	ND	ND	ND	ND
	4-甲基辛烷	7.50	846	23.22	36.99	43.21	45.22	22.11	37.01	42.21	56.99
	癸烷	11.51	929	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.44	ND
	3,5-二甲基庚烷	13.01	958	0.33	ND	ND	ND	ND	ND	ND	2.88
	4-乙庚烷	14.21	992	ND	0.21	0.78	1.23	0.11	0.13	0.98	1.56
	2,4-二甲基己烷	14.50	995	34.22	43.21	45.66	48.22	35.54	41.22	46.23	50.21
	环辛烷	15.70	1 007	ND	ND	ND	ND	ND	ND	1.44	5.89
	1,1-二甲乙基己烷	18.26	1 065	34.11	42.23	52.77	67.89	42.11	45.98	58.38	74.34
	壬烷	18.41	1 067	ND	11.34	14.32	39.88	ND	ND	29.33	43.22
	十二烷	23.26	1 181	ND	4.55	6.89	7.89	3.21	4.44	5.99	12.11
	十五烷	25.02	1 227	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	13.44
	十九烷	25.05	1 228	ND	ND	ND	8.99	ND	ND	7.99	11.23
	6,6-二乙基十八烷	25.41	1 244	ND	0.99	1.01	ND	0.22	ND	1.32	1.41
	二十四烷	26.73	1 259	ND	1.33	ND	2.22	0.89	1.11	1.98	3.21

续表 7

种类	化合物	保留时间/min	保留指数	传统熬制/min				微波熬制/min			
				15	30	45	60	15	30	45	60
烷烃类	2-甲基辛烷	26.74	1 259	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	4.32
	植烷	26.93	1 254	ND	0.94	1.43	3.45	0.43	0.98	1.43	6.44
	二十烷	27.21	1 260	4.55	5.99	7.32	16.88	ND	8.99	14.33	17.98
	十三烷	27.24	1 261	ND	ND	ND	19.32	ND	ND	13.76	20.11
	1-戊基-2-丙基-环戊烷	27.64	1 274	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.88	1.33
	二十三烷	29.52	1 358	ND	ND	0.65	0.66	ND	ND	ND	1.34
	十四烷	30.45	1 389	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.86
	二十八烷	32.84	1 487	0.11	0.32	0.89	1.11	ND	0.33	0.65	1.32
	五十四烷	32.85	1 487	1.23	2.21	3.33	9.43	2.98	4.56	6.99	19.33
	二十五烷	32.98	1 456	ND	ND	0.56	1.98	ND	0.78	1.92	5.11
	二十七烷	34.13	1 481	ND	ND	ND	ND	ND	ND	3.22	7.98
	11-丁基二十二烷	34.15	1 482	ND	ND	0.43	1.12	ND	0.11	0.67	8.98
	己烷	35.92	1 513	ND	ND	ND	0.76	ND	ND	ND	0.65
	三十五烷	35.94	1 514	ND	3.44	4.88	7.98	ND	18.98	18.56	16.79
	十七烷	38.13	1 558	ND	ND	ND	23.22	ND	0.55	12.11	19.87
	5,14-二丁基-十八烷	38.36	1 561	ND	ND	ND	ND	ND	ND	10.55	21.34
其他类	乳酰胺	2.29	<800	ND	ND	0.32	0.33	ND	ND	ND	ND
	1-甲基-3-苯基丙胺	2.84	<800	0.98	1.12	1.56	3.98	ND	0.54	1.44	9.09
	辛弗林	2.87	<800	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.56	1.34
	N-甲基辛胺	2.99	<800	ND	ND	ND	0.88	ND	0.56	0.76	1.12
	4-(2-氨基丙基)苯酚	3.29	<800	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.22	ND
	甲苯	4.75	<800	23.87	56.88	76.99	110.32	27.45	43.65	87.99	154.65
	5-甲基-2-苯基吡啶	6.35	822	ND	ND	2.33	6.78	ND	ND	5.67	9.88
	己基苯	7.37	837	ND	0.99	1.23	1.98	ND	2.11	ND	3.21
	对二甲苯	7.69	872	2.11	6.55	9.09	14.23	3.22	6.77	8.99	19.09
	间二甲苯	7.71	873	6.55	10.98	20.21	54.89	10.21	19.08	57.79	89.01
	2-氨基-5-甲基苯甲酸	11.72	928	ND	ND	0.12	0.89	ND	ND	0.45	2.22
	2-氨基苯并咪唑	12.72	938	ND	ND	0.44	1.88	ND	1.12	1.34	4.56
	5-氨基咪唑	12.73	938	45.22	65.76	77.33	90.45	45.76	49.66	87.56	122.45
	1-甲基苯并三唑	12.73	938	ND	ND	ND	0.87	ND	ND	0.54	1.09
	麦角乙二胺	19.48	1 093	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0.98
	四氢噻唑	23.69	1 229	ND	ND	0.21	8.99	ND	ND	ND	11.23
	2,6-二叔丁基苯醌	32.27	1 438	ND	0.99	1.53	4.98	ND	0.56	1.97	7.32
	2,6-二叔丁基苯酚	33.32	1 442	1.56	2.34	8.99	13.09	ND	1.65	3.45	16.98
	2,4-二叔丁基苯酚	33.72	1 470	12.11	23.22	25.22	34.13	ND	20.23	25.12	35.11
	3,5-二叔丁基苯酚	33.81	1 472	1.22	2.44	7.98	12.67	ND	3.56	9.09	17.88
	2,5-二叔丁基酚	33.87	1 479	9.09	14.32	19.08	34.78	ND	18.90	27.88	67.89

3 结论

两种熬制方式下,随着熬制时间的延长,鱼汤的感官评分均呈上升趋势,三氯乙酸—可溶性肽、氨基酸态氮、呈味核苷酸、有机酸、无机盐离子及游离氨基酸含量也均增加,且微波熬制的增幅较大。微波熬制 60 min 时,感官

评分最高,呈味核苷酸、有机酸含量分别达到 47.08、25.02 mg/100 mL;电子舌结果显示此时鱼汤鲜味、苦味、丰富性最强,与电子鼻 LDA 均表明其与其他样品风味差异大。8 组鱼汤中共检出 80 种挥发性物质,醛类、酯类和酮类为主要风味物质来源,微波熬制更易促进香味醛类、酮类、酯类和部分醇类物质的生成,多种风味物质仅在微

波熬制 60 min 的样品中检出。综上,微波熬制更利于鳕鱼汤滋味物质和风味物质的溶出与生成,提升汤品风味。未来可结合风味物质深入解析苦味成因;同时延长熬制时间,探究超过 1 h 熬制时间风味物质的动态变化规律,明确长时间微波熬制对汤品整体风味的影响。

参考文献

- [1] 王得发, 钟毅, 徐源锴, 等. 海洋多糖对鳕鱼糜凝胶特性影响研究[J]. 中国调味品, 2025, 50(2): 51-57.
Wang D F, Zhong Y, Xu Y K, et al. Study on effect of marine polysaccharides on gel properties of cod surimi[J]. China Condiment, 2025, 50(2): 51-57.
- [2] 闫虹. 狭鳕鱼排美拉德反应制备肉香型风味物及其抗氧化活性研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2015.
Yan H. Study on preparation and antioxidant activity of meat-like flavor by Maillard reaction from Alaska pollock frame[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2015.
- [3] Jensen I J, Larsen R, Rustad T, et al. Nutritional content and bioactive properties of wild and farmed cod (*Gadus morhua* L.) subjected to food preparation[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2013, 31(2): 212-216.
- [4] Uchida K, Fujitani M, Mizushige T, et al. Dietary Alaska pollack protein induces acute and sustainable skeletal muscle hypertrophy in rats[J]. Nutrients, 2022, 14(3): 547.
- [5] 王媛媛, 李学鹏, 王金厢, 等. 蒸煮方式对鳕鱼头汤呈味特性的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(15): 58-65.
Wang Y Y, Li X P, Wang J X, et al. Effects of cooking methods on flavor characteristics of pacific cod head soup[J]. Food Science, 2021, 42(15): 58-65.
- [6] Tan X Y, Qi L B, Fan F J, et al. Analysis of volatile compounds and nutritional properties of enzymatic hydrolysate of protein from cod bone[J]. Food Chemistry, 2018, 264: 350-357.
- [7] 郭耀华, 窦春蕾, 岳兰昕, 等. 新型牛骨汤工艺技术研究[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(1): 81-84.
Guo Y H, Dou C L, Yue L X, et al. Study on the new technic of bovine bone soup[J]. Food Research and Development, 2016, 37(1): 81-84.
- [8] Sun Y J, Lv F Y, Tian J H, et al. Domestic cooking methods affect nutrient, phytochemicals, and flavor content in mushroom soup[J]. Food Science & Nutrition, 2019, 7(6): 1 969-1 975.
- [9] 王英, 朱科学, 周惠明. 香菇菌汤熬制工艺参数的优化[J]. 食品科学, 2010, 31(10): 336-340.
Wang Y, Zhu K X, Zhou H M. Optimization of processing conditions of shiitake soup[J]. Food Science, 2010, 31(10): 336-340.
- [10] 吕广英, 丁玉琴, 孔进喜, 等. 加工方式对鱼骨汤营养和风味的影响[J]. 华中农业大学学报, 2013, 32(2): 123-127.
Lyu G Y, Ding Y Q, Kong J X, et al. Effects of processing conditions on the nutrition and flavor of the silver carp bone soup[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2013, 32(2): 123-127.
- [11] You M C, Yang P, Song H L, et al. Effects of three types of bone marrow extracts treated with different treatment methods on the taste of chicken soup[J]. Journal of Food Science and Technology, 2020, 57(2): 638-649.
- [12] 赵钜阳, 王萌, 徐滕宇. 微波加热对大麻哈鱼汤营养及感官品质的影响[J]. 肉类工业, 2020(3): 26-31.
Zhao J Y, Wang M, Xu M Y. Effects of microwave heating on nutrition and sensory quality of *Oncorhynchus keta* soup[J]. Meat Industry, 2020(3): 26-31.
- [13] 韩忠, 蔡梦洁, 成军虎, 等. 微波对天麻鱼头汤营养和安全性影响[J]. 现代食品科技, 2018, 34(2): 123-128, 279.
Han Z, Cai M J, Cheng J H, et al. Effects of microwave processing on the nutrition and safety of gastrodia and fish head soup[J]. Modern Food Science and Technology, 2018, 34(2): 123-128, 279.
- [14] Wang Q K, Li W, He Y H, et al. Novel antioxidative peptides from the protein hydrolysate of oysters (*Crassostrea talienwhanensis*) [J]. Food Chemistry, 2014, 145: 991-996.
- [15] Pei F, Shi Y, Gao X Y, et al. Changes in non-volatile taste components of button mushroom (*Agaricus bisporus*) during different stages of freeze drying and freeze drying combined with microwave vacuum drying[J]. Food Chemistry, 2014, 165: 547-554.
- [16] Kong Y, Zhang L L, Sun Y, et al. Determination of the free amino acid, organic acid, and nucleotide in commercial vinegars[J]. Journal of Food Science, 2017, 82(5): 1 116-1 123.
- [17] Kong Y, Yang X, Ding Q, et al. Comparison of non-volatile umami components in chicken soup and chicken enzymatic hydrolysate[J]. Food Research International, 2017, 102: 559-566.
- [18] Lekjing S, Venkatachalam K, Wangbenmad C. Biochemical evaluation of novel seabass (*Lates calcarifer*) fish essence soup prepared by prolonged boiling process[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2021, 14(10): 103365.
- [19] Li H J, Xia X F, Shao M L. Investigation of changes in the *in vitro* digestive properties of mirror carp (*Cyprinus carpio* L.) during postmortem storage based on protein degradation and oxidation[J]. Food Chemistry, 2025, 476: 143451.
- [20] Tan J Z, Xu J. Applications of electronic nose (e-nose) and electronic tongue (e-tongue) in food quality-related properties determination: a review[J]. Artificial Intelligence in Agriculture, 2020, 4: 104-115.
- [21] 武燕霓, 安玥琦, 熊善柏. 鱼汤风味的形成与调控研究进展[J]. 食品科学, 2023, 44(15): 251-260.
Wu Y N, An Y Q, Xiong S B. Research progress in the formation and regulation of fish soup flavor[J]. Food Science, 2023, 44(15): 251-260.
- [22] 郑琦, 田文慧, 岳玲, 等. 基于电子鼻和电子舌的电子束辐照对浓香型白酒的催陈效果[J]. 食品与机械, 2025, 41(5): 36-41.
Zheng Q, Tian W H, Yue L, et al. Aging acceleration effect of

- electron beam irradiation on Luzhou-flavor Baijiu using electronic nose and electronic tongue[J]. Food & Machinery, 2025, 41(5): 36-41.
- [23] 吴依蒙. 鱼肉在保藏过程中影响 ATP 关联化合物降解的因素及品质评价[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
- Wu Y M. Factors that affect change of ATP related compounds' decomposition for stored fish muscle and quality evaluation [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2016.
- [24] Kawai M, Okiyama A, Ueda Y. Taste enhancements between various amino acids and IMP[J]. Chemical Senses, 2002, 27 (8): 739-745.
- [25] Wang W L, Zhou X R, Liu Y. Characterization and evaluation of umami taste: a review[J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2020, 127: 115876.
- [26] 尹方帅, 郭焱, 王雪, 等. 风味组学结合电子感官分析红娘鱼骨汤熬煮过程中风味变化[J]. 食品工业科技, 2025, 46(20): 300-308.
- Yin F S, Guo Y, Wang X, et al. Analysis of changes in flavor of lepidotrigla microptera bone broth during boiling process based on flavoromics combined with electronic sensory detection technology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(20): 300-308.
- [27] 陈剑, 王婉婉, 李欢, 等. 多组学技术解析发酵水产食品风味形成机理研究进展[J]. 肉类研究, 2022, 36(9): 43-50.
- Chen J, Wang W W, Li H, et al. Progress in multi-omics research on flavor formation mechanism in fermented aquatic foods[J]. Meat Research, 2022, 36(9): 43-50.
- [28] 俞铮, 葛小通, 张佳汇, 等. 食品中鲜味的来源及其评价方法[J]. 食品科学, 2022, 43(19): 338-347.
- Yu Z, Ge X T, Zhang J H, et al. Sources and evaluation methods of umami taste in foods[J]. Food Science, 2022, 43 (19): 338-347.
- [29] Zou J, Xu M J, Zou Y F, et al. Chemical compositions and sensory characteristics of pork rib and Silkie chicken soups prepared by various cooking techniques[J]. Food Chemistry, 2021, 345: 128755.
- [30] 翁世兵, 孙恢礼. 海产鲜味物质及海产品特征滋味的研究进展[J]. 中国调味品, 2007, 32(11): 21-27.
- Weng S B, Sun H L. Marine umami substances and characteristic tastes of seafood[J]. China Condiment, 2007, 32 (11): 21-27.
- [31] 白旭婷. 菌菇大黄鱼汤的风味特性及代谢组学研究[D]. 锦州: 渤海大学, 2022.
- Bai X T. Study on flavor characteristics and metabolomics of mushroom-large yellow croaker soup[D]. Jinzhou: Bohai University, 2022.
- [32] Chiou T K, Lai M M. Comparison of taste components in cooked meats of small abalone fed different diets[J]. Fisheries Science, 2002, 68(2): 388-394.
- [33] 常诗洁, 高娟, 方东路, 等. 4 种蛋白酶水解双孢蘑菇效果比较及风味蛋白酶水解工艺优化[J]. 食品科学, 2018, 39(24): 276-283.
- Chang S J, Gao J, Fang D L, et al. Comparison of efficiencies of four proteases in hydrolyzing *Agaricus bisporus* and optimization of flavorzyme hydrolysis process[J]. Food Science, 2018, 39(24): 276-283.
- [34] Yang W X, Shi W Z, Zhou S N, et al. Research on the changes of water-soluble flavor substances in grass carp during steaming[J]. Journal of Food Biochemistry, 2019, 43(11): e12993.
- [35] 桂美娇, 栗紫慧, 韩梦丽, 等. 青田鲤鱼汤风味和滋味特性的分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(12): 296-303.
- Gui M J, Li Z H, Han M L, et al. Analysis of flavor and taste characteristics of qingtian carp soup[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(12): 296-303.
- [36] 葛艳争, 孙晓雪, 安永强, 等. 基于气相色谱—离子迁移谱、感官、电子鼻分析不同贮藏时间辣椒油风味成分[J]. 食品与机械, 2025, 41(2): 12-21.
- Ge Y Z, Sun X X, An Y Q, et al. Flavor components of chili oil with different storage durations based on gas chromatography-ion mobility spectrometry, sensory evaluation, and electronic nose analysis[J]. Food & Machinery, 2025, 41(2): 12-21.
- [37] 曾珊, 曹文红, 李佳蔚, 等. 复合脱腥联合喷雾干燥处理对牡蛎蛋白酶解产物风味的改良作用[J]. 食品与机械, 2025, 41 (1): 195-207.
- Zeng S, Cao W H, Li J W, et al. Flavor improvement of oyster protein enzymatic hydrolysates by combined treatment of composite deodorization and spray drying[J]. Food & Machinery, 2025, 41(1): 195-207.
- [38] 凌胜男, 刘特元, 陈雪叶, 等. 不同解冻方式对鳀鱼鲜度及挥发性风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(5): 322-330.
- Ling S N, Liu S Y, Chen X Y, et al. Effect of different thawing methods on the freshness and volatile flavor compounds of anchovy (*Engraulis encrasicolus*) [J]. Science and Technology of Food Industry, 2022, 43(5): 322-330.
- [39] Zhu D S, Ren X J, Wei L W, et al. Collaborative analysis on difference of apple fruits flavour using electronic nose and electronic tongue[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 260: 108879.
- [40] 袁可怡, 赵甜甜, 焦文娟, 等. 3 种天然提取物对金鲳鱼片脱腥及挥发性风味物质的影响[J]. 现代食品科技, 2026, 42(4): 242-253.
- Yuan K Y, Zhao T T, Jiao W J, et al. Effect of three natural extracts on deodorization and volatile flavor substances in golden pomfret fillets[J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(4): 242-253.