赵洪雷, 李珊慧, 李学鹏, 等. 超声辅助熬煮对雪菜大黄鱼汤风味特性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(6): 71−77. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030275

ZHAO Honglei, LI Shanhui, LI Xuepeng, et al. Effect of Ultrasonic-assisted Boiling on Flavor Quality of Pickled Potherb Mustard-Large Yellow Croaker Soup[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(6): 71−77. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030275

· 研究与探讨 ·

超声辅助熬煮对雪菜大黄鱼汤风味特性的影响

赵洪雷[1,2], 李珊慧[1], 李学鹏[1], 步　营[1], 仪淑敏[1], 励建荣[1], 徐永霞[1,*]

（1.渤海大学食品科学与工程学院, 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;
2.哈尔滨商业大学食品工程学院, 黑龙江哈尔滨 150028）

摘　要: 以大黄鱼和腌制雪菜为原料，分别采用传统熬煮法和超声辅助熬煮法制备鱼汤，通过感官评价、高效液相色谱、电子舌和电子鼻等技术，分析比较了不同方法熬煮过程中鱼汤风味特性的变化。结果表明，超声辅助熬煮显著提高了雪菜大黄鱼汤中可溶性蛋白、TCA-可溶性肽和氨基酸态氮含量，使鱼汤在鲜味、香气和口感方面的感官评分均优于传统熬煮样品。超声辅助熬煮明显提高了鱼汤中呈味核苷酸、有机酸和游离氨基酸的总含量，在熬煮 90 min 时分别达到最高值 57.99 mg/100 mL、95.22 mg/mL 和 121.02 mg/100 mL。超声组样品中脯氨酸、丝氨酸等甜味氨基酸的含量升高，而组氨酸、异亮氨酸、缬氨酸等苦味氨基酸的含量降低。电子舌分析表明，超声组样品的苦味降低，而鲜味特性明显增强。电子鼻分析可有效区分超声组与对照组样品间的气味差异。综上所述，超声辅助熬煮可有效促进鱼肉和雪菜中风味前体物质的释放和降解，并减少不良风味成分的生成，提升鱼汤的整体风味品质。

关键词: 大黄鱼, 雪菜, 超声波, 鱼汤, 风味

中图分类号: TS254.4　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)06−0071−07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025030275

本文网刊:

Effect of Ultrasonic-assisted Boiling on Flavor Quality of Pickled Potherb Mustard-Large Yellow Croaker Soup

ZHAO Honglei[1,2], LI Shanhui[1], LI Xuepeng[1], BU Ying[1], YI Shumin[1], LI Jianrong[1], XU Yongxia[1,*]

（1.College of Food Science and Engineering, Bohai University, National & Local Joint Engineering Research Center of Storage, Processing and Safety Control Technology for Fresh Agricultural and Aquatic Products, Jinzhou 121013, China;
2.College of Food Engineering, Harbin University of Commerce, Harbin 150028, China）

Abstract: Fish soup, using large yellow croaker and pickled potherb mustard as raw materials, was prepared by traditional boiling method and ultrasonic-assisted boiling method, respectively. The changes in flavor characteristics of fish soup during the boiling process were analyzed and compared by sensory evaluation, high performance liquid chromatography, electronic tongue and electronic nose techniques. The results showed that ultrasonic-assisted boiling significantly increased the contents of soluble protein, TCA-soluble peptides and amino nitrogen in the pickled potherb mustard-large yellow croaker soup, and the sensory scores of the soup in terms of umami, aroma and taste were all better than those of the traditionally boiled samples. Ultrasonic-assisted boiling obviously increased the total contents of flavor nucleotides, organic acids and free amino acids in the fish soup, reaching the maximum values of 57.99 mg/100 mL, 95.22 mg/mL and 121.02 mg/100 mL, respectively, after 90 min of boiling. The contents of sweet amino acids such as proline and serine in

收稿日期: 2025−03−20

基金项目: 辽宁省自然科学基金面上项目（2024-MS-187）。

作者简介: 赵洪雷（1982−）, 男, 硕士, 讲师, 研究方向: 水产品贮藏加工, E-mail: cristy320@163.com。

*** 通信作者:** 徐永霞（1983−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 水产品贮藏加工及风味化学, E-mail: xuyx1009@126.com。

the ultrasonic group samples increased, while the contents of some bitter amino acids such as histidine, isoleucine and valine reduced. Electronic tongue analysis indicated that the bitterness of the ultrasonic group samples decreased, while the umami characteristics were significantly enhanced. Electronic nose analysis could effectively distinguish the odor differences between the ultrasonic and control group samples. In summary, ultrasonic-assisted boiling can effectively promote the release and degradation of flavor precursors in fish meat and potherb mustard, and reduce the formation of undesirable flavor components, thereby improving the overall flavor quality of the fish soup.

Key words: large yellow croaker; potherb mustard; ultrasonic; fish soup; flavor

大黄鱼(*Larimichthys crocea*),俗称黄花鱼,为石首鱼科黄鱼属,因其肉质细嫩、味道鲜美且富含必需氨基酸、不饱和脂肪酸、蛋白质和微量元素而受到消费者的青睐[1]。雪菜(*Brassica juncea* var. *crispifolia*)属十字花科蔬菜,又名雪里蕻、雪里红等,其营养价值较高,且具有一定的抗氧化功能[2]。研究表明,雪菜中富含硫代葡萄糖苷类化合物,在腌制过程中代谢为异硫氰酸盐类物质,赋予腌制雪菜特有的芳香味,同时具有抗氧化、预防癌症、调节肠道菌群等多种生理功能[3]。在浙江省宁波市,以大黄鱼和腌制雪菜为主材的雪菜大黄鱼汤是一道传统名菜,当地民谣“大汤黄鱼摆咸畜”即指此道佳肴,其独特的风味兼具大黄鱼的鲜美和雪菜的清香。

鱼汤滋味鲜美、口感醇厚,营养组成丰富,且具有滋补身体、增强免疫力等功效,深受消费者的喜爱[4]。鱼汤在熬制过程中,鱼肉中的蛋白质、脂肪和糖类等营养成分逐渐溶解并分解为呈味核苷酸、氨基酸和呈味肽等风味物质。传统的加热熬煮方式能够赋予鱼汤色泽和风味,但存在耗时较长、能耗较高等缺点。近年来的研究发现,利用超声波的“声空化”现象能够有效促进植物细胞壁破裂并加速细胞内物质的释放[5],并能破坏肌肉纤维结构,加速蛋白质、核苷酸等风味前体物质的溶出[6−7],在食品加工中得到广泛应用。戚军等[8]研究表明,超声辅助熬煮显著提高了鸡汤中醇类和酯类风味物质的含量。孟倩[9]发现,超声辅助熬煮不仅能改善牛骨汤的气味特征,还能促进 5'-核苷酸的溶出。此外,Cichoski 等[10]研究表明,超声辅助煮制可加速脂质氧化,促进蛋白质水解生成更多的多肽和氨基酸,从而提升香肠的风味品质。由此可见,超声辅助熬煮能够提高效率,在提高风味物质的释放,改善食品的感官特性方面具有明显的优势,但目前关于超声辅助熬煮对鱼汤类产品风味特性的影响研究仍较少,尤其是在熬煮过程中风味物质变化规律方面的探讨还不够深入。

本研究以大黄鱼和腌制雪菜为原料,比较传统熬煮与超声辅助熬煮对雪菜大黄鱼汤风味的影响。通过氨基酸态氮、5'-核苷酸、有机酸和游离氨基酸等风味物质的含量变化,结合感官评价、电子舌和电子鼻分析,探究不同熬煮时间下雪菜大黄鱼汤风味特性的变化规律。本研究为超声辅助熬煮技术在鱼汤加工中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

宁德大黄鱼(冰鲜,尾重 260~280 g) 购于辽宁锦州市林西街水产市场;传统高盐腌制雪菜 浙江省宁波市余姚市临山酱菜厂;核苷酸标准品(纯度≥99%)、AMP、IMP 和 GMP、甲醇(色谱纯) 阿拉丁试剂有限公司;高氯酸、三氯乙酸等试剂 分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

THC-1000SF 型超声波煎煮锅 济宁天华超声电子仪器有限公司;FiveEasy Plus FE28 pH 计 上海梅特勒-托利多仪器公司;Biofuge stratos 台式冷冻高速离心机 美国 Thermo Fisher 公司;Insent SA402B 电子舌 日本 Insent 公司;UV-2550 紫外光谱仪 日本岛津公司;Agilent 1260 Infinity 高效液相色谱仪 美国 Agilent 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 雪菜大黄鱼汤的制备 参考李珊慧等[11]的方法制备雪菜大黄鱼汤。将大黄鱼去内脏,清洗干净后备用。雪菜用清水浸泡 30 min 后捞出,控干水分并切成小段。将处理好的大黄鱼和雪菜按照 4∶1 的质量比放入蒸煮袋中,按照 1∶3(鱼∶水)的质量比加水,并按加水量的 0.5% 添加食盐,封口后放入超声波蒸煮锅中(熬煮温度 95 ℃、超声功率 700 W),分别熬煮 30、60、90 min 后过滤,得到雪菜大黄鱼汤样品,分别以 U30 min、U60 min、U90 min 表示。将超声波发生装置关闭,重复上述熬煮工序即为传统熬煮对照组,熬煮 30、60、90 min 的样品分别以 C30 min、C60 min、C90 min 表示。

1.2.2 感官评定 参考李珊慧等[11]的方法并稍作修改。选取 10 名食品专业的研究生(5 男 5 女),经过专业感官培训后对雪菜大黄鱼汤进行感官评定,评分标准见表 1。

1.2.3 可溶性蛋白含量的测定 采用双缩脲法测定。取 1 mL 适度稀释的鱼汤样品,加入 3 mL 双缩脲试剂,混匀后反应 30 min,在 540 nm 处测定吸光值。

1.2.4 TCA-可溶性肽含量的测定 准确量取 3 mL 鱼汤,加入 5% 三氯乙酸溶液 27 mL,均质后置于 4 ℃ 冰箱静置 1 h,随后以 11000 r/min 离心 10 min,取上清液,采用 Lowry 法[12]测定可溶性肽含量。

1.2.5 氨基酸态氮含量的测定 参照 GB 5009.235-2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸态氮的测定》,利用甲醛滴定法测定。

表 1　雪菜大黄鱼汤感官评价标准

Table 1　Sensory evaluation standard of pickled potherb mustard-large yellow croaker soup

评价指标	权重(%)	评价标准	得分(分)
气味	30	香气浓郁，雪菜清香与鱼香味融合，无腥味	8~10
		香气一般，雪菜清香与鱼香味协调较差，腥味较淡	4~7
		香气不足，腥味较重	0~3
滋味	30	鲜味浓郁，咸酸适宜，口味协调	8~10
		鲜味一般，咸酸适中，口味较协调	4~7
		鲜味不足，过酸、过咸或咸度不足，口味不协调	0~3
色泽	20	呈乳白色，颜色均匀，无沉淀	8~10
		呈淡黄色，颜色较均匀，有少量沉淀	4~7
		颜色发暗，较浑浊，有较多沉淀	0~3
可接受程度	20	整体风味协调，可接受度高	8~10
		风味协调性一般，可接受度良好	4~7
		风味不佳，难以接受	0~3

1.2.6　电子舌测定　将鱼汤样品在 4 ℃ 下以 8000 r/min 离心 10 min，取上清液，使用活化后的传感器进行测定，采集时间 120 s，每秒采集 1 次，样品测试循环 4 次，选择后 3 组数据进行分析。

1.2.7　呈味核苷酸的测定　参考徐永霞等[13]的方法，采用高效液相色谱法测定鱼汤中呈味核苷酸的含量。色谱条件：C_{18} 柱（5 μm，4.6 mm×250 mm），柱温 28 ℃，检测波长 245 nm；流动相由 0.05 mol/L KH_2PO_4（pH4.5）和甲醇组成，流速 0.8 mL/min；进样量 20 μL。采用外标法进行定量。

标准曲线的绘制：将 AMP、IMP 和 GMP 配制成 0.01、0.02、0.04、0.06、0.08、0.10 mg/mL 的混合标准溶液，在相同的液相条件下进样，以峰面积与对应的质量浓度绘制标准曲线。

1.2.8　有机酸的测定　取 5 mL 鱼汤样品，加入 0.25 mL 15% 的高氯酸溶液，均质后静置 20 min，在 4 ℃ 下离心 10 min（9600 r/min），取上清液过 0.22 μm 滤膜，采用高效液相色谱法测定[13]。

标准曲线的绘制：将苹果酸、乳酸、柠檬酸和琥珀酸配制成 0.01、0.10、0.25、0.50、1.00 mg/mL 的混合标准溶液，在相同的液相条件下进样，以峰面积与对应的质量浓度绘制标准曲线，采用外标法进行定量。

1.2.9　游离氨基酸的测定　取 5 mL 鱼汤样品，加入 15 mL 15% 的 TCA 溶液，均质后于 4 ℃ 下静置 2 h，离心取 5 mL 上清液，用 3 mol/mL 氢氧化钠溶液调节 pH 至 2.0，定容至 10 mL，过 0.22 μm 水系滤膜后用氨基酸自动分析仪测定。

1.2.10　电子鼻分析　取 5 mL 鱼汤样品置于 50 mL 烧杯中，立即用三层保鲜膜封口，在 40 ℃ 水浴锅中静置 30 min，用于电子鼻的检测。电子鼻检测参数：气体流量 300 mL/min，顶空温度 25 ℃，清洗时间 120 s，样品检测时间 120 s，每个样品重复检测 3 次。

1.3　数据处理

采用 Origin 2019 作图，用 SPSS 21.0 进行显著性分析，$P<0.05$ 表示差异显著。

2　结果与分析

2.1　感官评分和可溶性蛋白含量的变化

如图 1 所示，随熬煮时间的延长，雪菜大黄鱼汤的感官评分和可溶性蛋白含量呈上升趋势，传统熬制 30 min 鱼汤的感官评分和可溶性蛋白含量分别为 5.75 和 10.31 mg/mL，而熬制至 90 min 时分别达到 7.70 和 12.85 mg/mL，超声组亦有相同的变化趋势。这是因为随着熬煮时间的增加，鱼肉和雪菜中的蛋白质、糖类等物质不断溶出并降解，使鱼汤中风味物质的种类及含量增加，从而提高鱼汤的整体风味和感官品质[14]。此外，在相同熬煮时间下，超声组样品的感官评分和可溶性蛋白含量显著高于对照组（$P<0.05$），在超声辅助熬煮 90 min 时分别达到最大值 8.75 和 61.04 mg/mL。这可能是由于超声波与介质的相互作用促进了鱼肉和雪菜中可溶性蛋白和可溶性糖等风味前体物质的释放和溶出，并逐渐降解生成小肽、游离氨基酸等呈味物质，从而使鱼汤滋味鲜甜、口感醇厚[15]。另外，超声波的空化效应和剪切作用使蛋白质的表面疏水性增强，促进蛋白质的乳化作用[16]，有助于汤汁更加浓郁，呈乳白色。

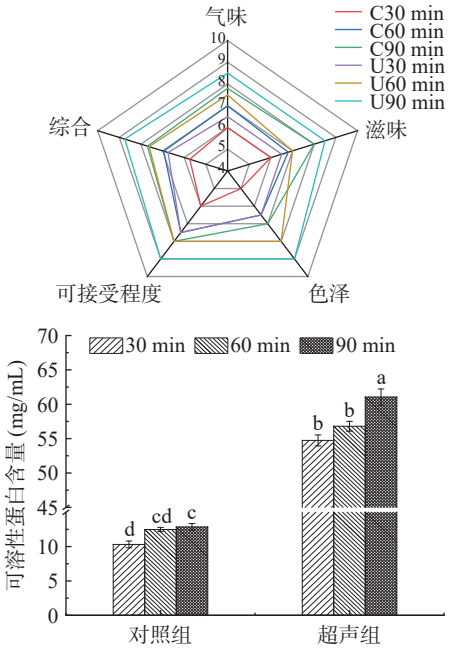


图 1　不同熬煮时间对雪菜大黄鱼汤感官评分和可溶性蛋白含量的影响

Fig.1　Effects of different cooking time on sensory score and soluble protein content of pickled potherb mustard-large yellow croaker soup

注：不同小写字母表示差异显著（$P<0.05$），图 2 同。

2.2　TCA-可溶性肽和氨基酸态氮含量的变化

鱼汤样品中的 TCA-可溶性肽和氨基酸态氮含量可以反映原料中蛋白质的水解程度，其含量越高说明蛋白质的水解度越大[17]。如图 2 所示，随熬煮时间

的延长，雪菜大黄鱼汤的 TCA-可溶性肽含量显著升高（P<0.05），氨基酸态氮含量在熬煮 30~60 min 时无显著变化，但在熬煮至 90 min 时显著升高（P<0.05）。在加热时鱼肉蛋白结构逐渐松散，并降解产生小分子肽，进一步热降解生成游离氨基酸等呈味物质，从而使鱼汤味道鲜美[18]。此外，由图可见，相同熬煮时间下，超声组的 TCA-可溶性肽和氨基酸态氮含量均显著高于对照组（P<0.05），这是由于超声波的机械剪切力和空化效应促进了蛋白质的降解，产生更多的小分子肽和游离氨基酸[19]。

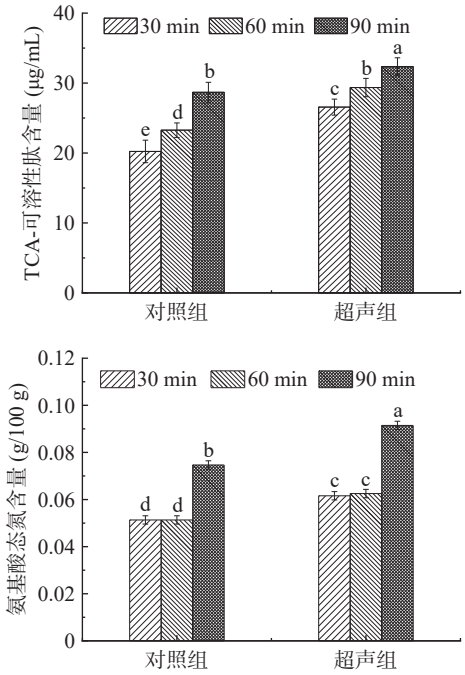


图 2 不同熬煮时间对雪菜大黄鱼汤 TCA-可溶性肽和氨基酸态氮含量的影响

Fig.2 Effects of different cooking time on TCA-soluble peptide and amino acid nitrogen content of pickled potherb mustard-large yellow croaker soup

2.3 电子舌分析

电子舌系统能够模仿人类舌头，可以量化样品的味觉属性，相较于传统的感官评价法具有更加客观、快速和准确的特点[20]。如图 3 所示，不同熬煮时间下雪菜大黄鱼汤的滋味轮廓基本相似，但在鲜味和回味-B 响应值上有所差异。随熬煮时间的延长，鲜味和回味-B 的响应值增大，且超声组样品明显高于对照组，其中 C90 min 的鲜味和回味-B 响应值分别为 0.72 和 0.50，U90 min 则分别达到 0.80 和 0.54。从苦味响应值来看，在相同熬煮时间下，超声组样品略低于对照组，如 C90 min 苦味响应值为 3.72，而 U90 min 为 3.66。可能是因为超声波的空化作用和热效应促进了蛋白质的水解和 ATP 的降解，生成一些小分子呈味物质，增强鱼汤的鲜味特性，从而掩盖了苦味[21]。芦江会等[22] 研究也发现，超声辅助酶解可增加龙鱼头蛋白肽的鲜味氨基酸含量，从而降低其苦味。

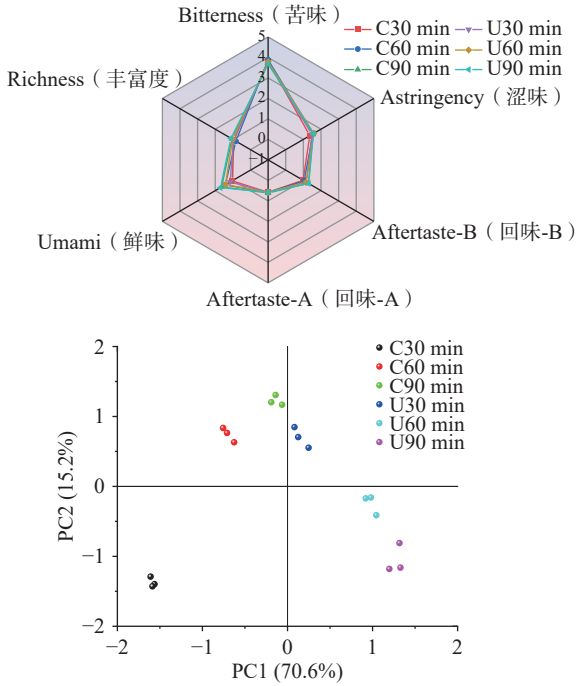


图 3 不同熬煮时间下雪菜大黄鱼汤电子舌雷达图和主成分分析图

Fig.3 Electronic tongue radar map of pickled potherb mustard-large yellow croaker soup under different cooking time

PCA 是对数据进行降维处理的一种无监督分析方法[23]。由图 3 可知，PC1 的贡献率为 70.6%，PC2 的贡献率为 15.2%，总贡献率为 85.8%，说明 PC1 和 PC2 可以反映不同熬煮时间下雪菜大黄鱼汤的主要滋味信息。从主成分分析图中样品的分散度来看，对照组样品均处于左侧象限，超声组样品均分布于右侧象限，样品之间互不重叠，说明超声辅助熬煮使雪菜大黄鱼汤的滋味发生明显改变[24]。此外，不同熬煮时间下的雪菜大黄鱼汤样品分布分散，其中 C30 min 样品与其他样品间的距离较远，说明与其他样品的滋味差异较大。

2.4 呈味核苷酸分析

鱼肉中的三磷酸腺苷（ATP）降解生成的呈味核苷酸和鱼汤的滋味特性密切相关。由表 2 可知，雪菜大黄鱼汤中主要检测出 5'-GMP、5'-IMP 和 5'-AMP 三种呈味核苷酸，能够与谷氨酸等鲜味氨基酸产生协同效应，增强鱼汤的整体鲜味强度[25]。随熬煮时间的增加，鱼汤中呈味核苷酸的总量逐渐增大，且在相同熬煮时间下，超声组鱼汤的核苷酸总量明显高于对照组，其中 U90 min 样品的核苷酸总量最高（57.99 mg/100 mL）。超声波的空化效应和机械作用可以破坏鱼肉的细胞结构，加速 ATP 的降解，进而生成更多的呈味核苷酸[26]。GMP 的呈味阈值为 12.5 mg/100 mL，在所有鱼汤样品中检测出的含量均大于其阈值，说明其具有较强的鲜味增强活性，是雪菜大黄鱼汤鲜味的主要贡献者，其含量随熬煮时间的延长明显升高。IMP 和 AMP 能够提升鱼汤的鲜甜味[3]，在鱼汤中检出的含量相对较少。

表 2　不同熬煮时间对雪菜大黄鱼汤核苷酸含量的影响

Table 2　Effects of different cooking time on nucleotide content of pickled potherb mustard-large yellow croaker soup

核苷酸名称	核苷酸含量(mg/100 mL)					
	C30 min	C60 min	C90 min	U30 min	U60 min	U90 min
5'-AMP	11.01±0.30^{ab}	11.08±0.17^{ab}	11.43±0.04^{a}	10.88±0.13^{b}	11.30±0.17^{ab}	11.28±0.06^{ab}
5'-IMP	4.01±0.51^{b}	3.93±0.49^{b}	5.05±0.15^{a}	5.87±0.13^{a}	5.51±0.22^{a}	5.23±0.05^{a}
5'-GMP	25.32±2.28^{c}	32.13±2.03^{bc}	36.27±1.85^{ab}	33.59±3.24^{b}	38.54±2.05^{ab}	41.47±1.16^{a}
总量	40.34±3.09^{d}	47.14±2.69^{cd}	52.75±2.04^{abc}	50.34±3.50^{bc}	55.36±2.44^{ab}	57.99±1.27^{a}

注：同行中不同小写字母表示差异显著(P<0.05)，表3同。

2.5　有机酸分析

有机酸是汤品风味的重要组成部分，它们贡献酸味，并与其他风味物质相互作用，影响整体风味平衡[27]。如表 3 所示，雪菜大黄鱼汤中检出的有机酸主要包括苹果酸、乳酸、柠檬酸和琥珀酸，其中含量最高的是琥珀酸，约占有机酸总量的 37.62%~52.45%，其次是乳酸。熬煮时间对雪菜大黄鱼汤中有机酸含量具有显著影响(P<0.05)，随熬煮时间的延长，鱼汤中四种有机酸的含量均呈显著上升(P<0.05)。在熬煮过程中，鱼肉和雪菜中的有机酸会逐渐释放到鱼汤中，此外鱼肉和雪菜中的糖类、氨基酸等成分发生热降解，也会生成有机酸[28]。由表 3 可见，在相同熬煮时间下，超声组鱼汤中有机酸的含量显著高于对照组(P<0.05)，可能是因为超声的空化效应加速了原料组织结构的破坏，促进有机酸的释放，同时超声波可能加速某些成分的热降解，生成更多的有机酸[29]。

表 3　不同熬煮时间对雪菜大黄鱼汤有机酸含量的影响

Table 3　Effects of different cooking time on organic acid content of pickled potherb mustard-large yellow croaker soup

有机酸名称	有机酸含量(mg/mL)					
	C30 min	C60 min	C90 min	U30 min	U60 min	U90 min
苹果酸	4.08±0.07^{d}	8.23±0.20^{c}	12.14±0.12^{b}	8.81±0.23^{c}	12.63±0.32^{b}	17.11±0.10^{a}
乳酸	17.00±0.10^{f}	21.66±0.06^{d}	27.36±0.05^{b}	19.73±0.11^{e}	25.73±1.18^{c}	31.28±0.20^{a}
柠檬酸	2.21±0.10^{e}	3.04±0.23^{d}	3.83±0.07^{b}	2.85±0.35^{d}	3.37±0.04^{c}	5.37±0.08^{a}
琥珀酸	22.91±1.77^{f}	24.37±1.01^{e}	26.19±1.74^{d}	34.74±0.90^{c}	37.76±1.03^{b}	41.46±0.96^{a}
总量	46.20±2.04^{f}	57.30±1.50^{e}	69.52±1.98^{c}	66.13±1.59^{d}	79.49±2.57^{b}	95.22±1.34^{a}

2.6　游离氨基酸分析

游离氨基酸是重要的呈味小分子物质，其与呈味核苷酸具有协同效应，对提升鱼汤整体风味具有重要作用[18]。如表 4 所示，在雪菜大黄鱼汤中共检测到 16 种游离氨基酸，其中甘氨酸、赖氨酸、脯氨酸、谷氨酸、丝氨酸和丙氨酸等氨基酸的含量较高。随熬煮时间的延长，鱼汤中游离氨基酸的总量逐渐增加，在熬煮过程中，鱼肉和雪菜中的蛋白质发生降解生成可溶性肽溶于汤中，进一步降解生成游离氨基酸[29]。此外，超声组鱼汤中游离氨基酸的总量明显高于相同熬煮时间下的对照组样品，可能是因为超声的空化作用破坏了肌肉的组织结构，产生自由基，促使蛋白质降解水平增加，小分子肽降解产生更多的氨基酸，从而增加了游离氨基酸的含量[6,30]。超声辅助熬煮使鱼汤中一些苦味氨基酸如组氨酸、异亮氨酸、缬氨酸和亮氨酸的含量降低，而甜味氨基酸如脯氨酸、丝氨酸的含量明显升高，甜味氨基酸能够与鲜味氨基酸产生协同作用，从而增强鱼汤的整体风味。

表 4　不同熬煮时间对雪菜大黄鱼汤游离氨基酸含量的影响

Table 4　Effects of different cooking time on free amino acid content of pickled potherb mustard-large yellow croaker soup

呈味类型	氨基酸名称	氨基酸浓度(mg/100 mL)					
		C30 min	C60 min	C90 min	U30 min	U60 min	U90 min
鲜味	天冬氨酸	2.93	4.00	4.04	2.76	4.11	4.76
	谷氨酸	7.85	10.05	11.84	8.59	9.32	11.89
甜味	丙氨酸	5.91	7.00	9.25	7.50	6.76	8.29
	甘氨酸	10.43	8.16	20.76	11.19	8.71	17.46
	苏氨酸	4.06	5.05	5.25	3.53	2.97	8.27
	丝氨酸	4.38	4.82	7.36	5.07	6.14	9.32
	脯氨酸	7.85	10.56	16.31	12.56	18.19	24.30
苦味	精氨酸	1.80	2.03	2.48	2.21	2.25	2.43
	蛋氨酸	0.53	0.62	0.80	0.64	0.54	0.68
	赖氨酸	11.84	11.97	14.06	6.79	9.35	18.24
	苯丙氨酸	1.65	1.75	2.17	1.79	1.73	1.96
	组氨酸	3.31	4.18	6.10	3.16	3.74	5.14
	异亮氨酸	1.17	1.41	1.63	1.27	1.30	1.37
	缬氨酸	1.86	2.61	2.86	2.04	2.10	2.35
	亮氨酸	2.23	2.62	3.23	2.47	2.53	2.73
	酪氨酸	1.43	1.54	2.05	1.59	1.64	1.83
	总量	69.23	78.37	110.19	73.16	81.38	121.02

2.7　电子鼻分析

电子鼻是一种对食物整体香气进行检测的技术，线性判别分析(LDA)是在主成分分析基础上对电子鼻传感器的响应值进行优化，从而更直观的观察样品间的气味差异[31]。以电子鼻 10 个传感器的响应值为参数变量，对 6 种鱼汤进行 LDA 分析，结果如图 4 所示。电子鼻 LDA 分析图中 PC1 和 PC2 的

贡献率分别为 83.99% 和 11.51%，累计贡献率为 95.5%，超过了 85%，说明 LDA 分析能较好的反映雪菜大黄鱼汤样品的整体气味信息。由图 4 可见，6 种鱼汤样品之间没有重叠，说明样品间的气味差异可被有效区分。根据样品所在象限位置，大致可分为两个部分，其中超声组样品分布较集中，主要位于 LDA 图的左下方，而对照组样品主要位于右侧区域，可见两组鱼汤样品的气味有明显差异。此外，随熬煮时间的延长，同组中不同样品沿 PC1 轴上的分布距离逐渐变大，说明样品间的气味差异越来越明显。

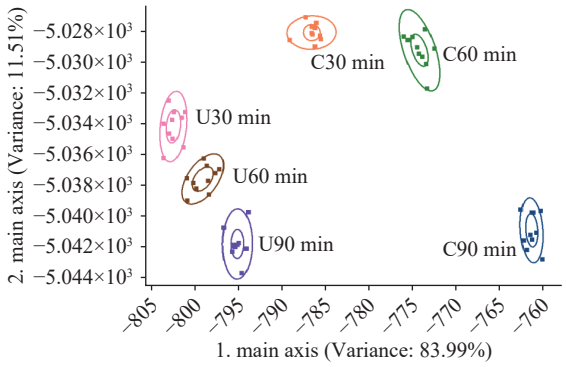


图 4 不同熬煮时间下雪菜大黄鱼汤电子鼻 LDA 分析

Fig.4 Electronic nose LDA analysis of pickled potherb mustard-large yellow croaker soup under different cooking time

3 结论

研究了超声辅助熬制对雪菜大黄鱼汤风味特性的影响。超声波能够促进熬制过程中鱼肉和雪菜中风味前体物质的溶出和降解，提升雪菜大黄鱼汤的感官评分、可溶性蛋白、TCA-可溶性肽、氨基酸态氮和有机酸含量。超声辅助熬制能够加速 ATP 的降解，提高鱼汤中呈味核苷酸的含量，尤其是 5'-GMP 的含量明显升高。超声辅助熬制促进了蛋白质的热降解，使鱼汤中游离氨基酸的总含量显著增加，使脯氨酸、丝氨酸等甜味氨基酸的含量升高，同时降低了一些苦味氨基酸的含量，从而改善鱼汤的整体风味。电子舌和电子鼻分析结果显示，超声辅助熬煮的鱼汤在滋味和气味轮廓上与传统熬煮的鱼汤明显不同。综上，超声辅助熬制能够改善雪菜大黄鱼汤的风味特性，然而关于不同超声条件对鱼汤风味的影响还有待进一步研究。

© The Author(s) 2026. 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] YIN Jing, LI Yaoling, ZHONG Weiquan, et al. Effect of konjac glucomannan-based preservation pads on quality changes in refrigerated large yellow croaker (*Pseudosciaena crocea*)[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2024, 276: 133752.

[2] ZHANG Chengcheng, CHEN Jianbing, LI Xiaoqiong, et al. Bacterial community and quality characteristics of the fermented potherb mustard (*Brassica juncea* var. *multiceps*) under modified atmospheres[J]. Food Research International, 2019, 116: 266−275.

[3] 徐祥, 谷贵章, 尚佳宇, 等. 低盐雪菜中呈味核苷酸关联物的检测及贮藏过程中的变化[J]. 食品科学, 2024, 45(4): 315−322. [XU Xiang, GU Guizhang, SHANG Jiayu, et al. Detection and changes in contents of flavor nucleotide-related compounds in low-salt pickled potherb mustard during storage[J]. Food Science, 2024, 45(4): 315−322.]

[4] LÜ Yanan, BAI Xuting, ZHAO Honglei, et al. Flavor characteristics of large yellow croaker soup served with different dried edible fungi[J]. Food Chemistry, 2023, 21: 101059.

[5] 刘星宇, 廖艺超, 王壹, 等. 超声波联用技术在植物活性成分提取中的应用研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(14): 319−327. [LIU Xingyu, LIAO Yichao, WANG Yi, et al. Research progress on application of ultrasound hyphenated technique in extraction of active phytochemicals[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(14): 319−327.]

[6] LIN Weifang, ZHU Jiafei, SUN Yangying, et al. Effects of ultrasonic-assisted marinating on degradation of beef protein and formation of flavor precursors[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 133: 106407.

[7] LIU Dongyin, DU Liu, HUANG Qi, et al. Effects of ultrasound treatment on muscle structure, volatile compounds, and small molecule metabolites of salted *Culter alburnus* fish[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 97: 106440.

[8] 戚军, 陈亚, 徐颖, 等. 超声辅助炖制对黄羽鸡汤香味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(4): 153−158. [QI Jun, CHEN Ya, XU Ying, et al. Effect of ultrasonic assisted with stewing on aroma of broth prepared with yellow-feathered chickens[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(4): 153−158.]

[9] 孟倩. 超声辅助熬煮用于改善牛骨汤加工工艺的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021. [MENG Qian. Study on improving processing technology of beef bone soup by ultrasonic assisted boiling [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.]

[10] CICHOSKI A J, Da SILVA J S, LEÃES Y S V, et al. Effects of ultrasonic-assisted cooking on the volatile compounds, oxidative stability, and sensory quality of mortadella[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 72: 105443.

[11] 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. [LI Shanhui, LIN Dengfeng, ZHAO Honglei, et al. Optimization of ultrasonic-assisted cooking technology and taste evaluation of *Larimichthys crocea* soup with *Brassica juncea* var. crispifolia by combination of double response values[J]. China Condiment, 2024, 49(6): 43−49,76.]

[12] LOWRY O, ROSEBROUGH N, FARR A L, et al. Protein measurement with the folin phenol reagent[J]. Journal of Biological Chemistry, 1951, 193(1): 265−275.

[13] 徐永霞, 白旭婷, 曲诗瑶, 等. 蟹味菇添加量对鳕鱼汤风味特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(10): 139−144. [XU Yongxia, BAI Xuting, QU Shiyao, et al. Effect of addition amount of crab mushroom on flavor characteristics of pollock fish soup[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(10): 139−144.]

[14] 杨平, 王瑶, 宋焕禄, 等. 不同熬制条件下猪肉汤中滋味成分的变化[J]. 中国食品学报, 2018, 18(12): 247−260. [YANG Ping, WANG Yao, SONG Huanlu, et al. Analysis of non-volatile flavor components in pork broth with different cooking conditions[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2018,

18(12)：247−260.］
［15］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 Yanni, AN Yueqi, XIONG Shanbai. Research progress in the formation and regulation of fish soup flavor[J]. Food Science, 2023, 44(15)：251−260.］
［16］刘二蒙, 冯拓, 高献礼, 等. 超声波加速液态发酵食品风味成熟研究进展[J]. 食品与发酵工业，2021, 47(17)：283−289.［LIU Ermeng, FENG Tuo, GAO Xianli, et al. Research advances of flavor maturation of fermented liquid foods accelerated by sonication[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(17)：283−289.］
［17］汪晓瑜, 赵利, 白春清, 等. 基于不同糟制温度对酒糟鱼理化性质及蛋白质降解的研究[J]. 食品工业，2022, 43(11)：144−149.［WANG Xiaoyu, ZHAO Li, BAI Chunqing, et al. The study of the physicochemical properties and protein degradation of lees fish based on different bad brewing temperatures[J]. The Food Industry, 2022, 43(11)：144−149.］
［18］许惠雅. 乳酸菌和风味蛋白酶联合对发酵草鱼品质的影响[D]. 上海：上海海洋大学, 2022.［XU Huiya. Effects of lactic acid bacteria and flavourzyme on the quality of fermented grass carp (*Ctenopharyngodon* idellus)[D]. Shanghai：Shanghai Ocean University, 2022.］
［19］张茸茸, 刘佳丽, 李亦凡, 等. 超声技术对肌原纤维蛋白结构的影响及其在肌肉食品中的应用现状[J]. 食品安全质量检测学报，2023, 14(21)：10−19.［ZHANG Rongrong, LIU Jiali, LI Yifan, et al. Influence of ultrasound technology on the structure of myofibrillar proteins and its current applications in muscle-based food products[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(21)：10−19.］
［20］HAYASHIDA S, HAGI T, KOBAYASHI M, et al. Comparison of taste characteristics between koji mold–ripened cheese and *Camembert* cheese using an electronic tongue system[J]. Journal of Dairy Science, 2023, 106(10)：6701−6709.
［21］刘薇, 赵赵, 朱文政, 等. 超声波辅助煮制对畜禽肉制品品质影响研究进展[J]. 食品工业科技，2023, 44(7)：419−427.［LIU Wei, ZHAO Zhao, ZHU Wenzheng, et al. Research progress on the effect of ultrasonic assisted cooking on the quality of livestock and poultry meat products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(7)：419−427.］
［22］芦江会, 陈跃文, 付晶晶, 等. 超声辅助酶解对龙头鱼蛋白肽理化性质及风味特性的影响[J]. 食品与机械，2023, 39(11)：38−44.［LU Jianghui, CHEN Yuewen, FU Jingjing, et al. The effect of ultrasound assisted enzymatic hydrolysis on the physicochemical properties and flavor characteristics of protein peptides from *Harpodon nehereus*[J]. Food and Machinery, 2023, 39(11)：38−44.］
［23］WANG Zhaoxiang, CHEN Xiaoyi, LIU Qianqian, et al. Untargeted metabolomics analysis based on LC-IM-QTOF-MS for discriminating geographical origin and vintage of Chinese red wine[J]. Food Research International, 2023, 165：112547.
［24］ZHU Danshi, REN Xiaojun, WEI Liwei, et al. Collaborative analysis on difference of apple fruits flavour using electronic nose and electronic tongue[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 260：108879.
［25］LIU Chunsheng, MENG Fantong, TANG Xianming, et al. Comparison of nonvolatile taste active compounds of wild and cultured mud crab *Scylla paramamosain*[J]. Fisheries Science, 2018, 84(5)：897−907.
［26］吴江红. 特鲜浓缩鸡汤料配方及加工工艺研究[D]. 无锡：江南大学, 2022.［WU Jianghong. Study on formula and processing technology of specially umami concentrated chicken soup[D]. Wuxi：Jiangnan University, 2022.］
［27］李自会. 鸡肉风味基料的酶解制备及其呈味机理研究[D]. 郑州：河南工业大学, 2023.［LI Zihui. Preparation of chicken flavor base by enzymatic hydrolysis and its flavor formation mechanism[D]. Zhengzhou：Henan University of Technology, 2023.］
［28］孙新生, 杨凌寒. 鸡汤加工工艺研究进展[J]. 现代食品，2023, 29(13)：18−21.［SUN Xinsheng, YANG Linghan. Research progress of chicken soup processing technology[J]. Modern Food, 2023, 29(13)：18−21.］
［29］袁波. 粉末油脂对鲫鱼汤微纳米颗粒及风味形成机制的影响研究[D]. 南昌：江西科技师范大学, 2023.［YUAN Bo. Effect of powdered oil on micro-nano particles and flavor formation mechanism of crucian carp soup[D]. Nanchang：Jiangxi Science and Technology Normal University, 2023.］
［30］HAN Menglin, BU Ying, HE Wei, et al. Effects of different thermoultrasonic time on quality characteristics of fishbone broth and correlation analysis on taste substances[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(12)：e17259.
［31］王子凌, 张子豪, 曾璐瑶, 等. 不同卤制加工阶段中食盐添加量对小龙虾尾品质及挥发性风味的影响[J]. 食品科学，2024, 45(11)：52−60.［WANG Ziling, ZHANG Zihao, ZENG Luyao, et al. Effect of salt addition at different processing stages on the quality and volatile flavor components of marinated crayfish tails[J]. Food Science, 2024, 45(11)：52−60.］