



食品工业科技

SCIENCE AND TECHNOLOGY OF FOOD INDUSTRY

半月刊

权威 · 核心 · 领先 · 实用 · 全面

美国《化学文摘》CA

日本科学技术振兴机构数据库JST

北大核心期刊

中国生物医学文献系统SinoMed收录期刊

中国精品科技期刊

英国《食品科技文摘》FSTA

中国科技核心期刊CSTPCD

RCCSE中国核心学术期刊

中国农林核心期刊A

不同解冻方式对鱼鲜度及挥发性风味物质的影响

凌胜男, 刘特元, 陈雪叶, 王红丽, 王锡昌, 施文正

Effect of Different Thawing Methods on the Freshness and Volatile Flavor Compounds of Anchovy (*Engraulis encrasicolus*)

LING Shengnan, LIU Teyuan, CHEN Xueye, WANG Hongli, WANG Xichang, and SHI Wenzheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021050273>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

杀菌方式对湘西酸鱼挥发性风味物质及质构的影响

Effects of Sterilization Methods on Volatile Flavor Compounds and Texture of Xiangxi Sour Fish

食品工业科技. 2018, 39(19): 237-242

罗伊氏乳杆菌对发酵鱼糜挥发性风味物质的影响

Effect of *Lactobacillus reuteri* on Volatile Flavor Compounds of Fermented Surimi

食品工业科技. 2021, 42(12): 240-245

基于电子鼻和气质联用评价煮制方式对香菇汤挥发性风味物质的影响

Effect of Cooking Methods on Volatile Flavor Compounds in *Lentinus edodes* Soups Analyzed by Electronic Nose and SPME-GC-MS

食品工业科技. 2020, 41(20): 6-11,19

SPME-GC-MS结合ROAV分析腌制时间对大河乌猪火腿挥发性风味物质的影响

Analysis of the Effect of Curing Time on the Volatile Flavor Compounds of Dahe Black Pig Ham by SPME-GC-MS and ROAV

食品工业科技. 2021, 42(18): 317-324

不同干燥方式对热反应鸡粉挥发性风味物质的影响

Effects of Different Drying Methods on Various Flavor Compounds of Heat Reaction Chicken Powder

食品工业科技. 2020, 41(15): 53-58,64

不同解冻方式对速冻西兰花品质影响

Effect of Different Thawing Methods on Quality of Quick-frozen Broccoli

食品工业科技. 2020, 41(16): 266-270



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

凌胜男, 刘特元, 陈雪叶, 等. 不同解冻方式对鲱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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050273

LING Shengnan, LIU Teyuan, CHEN Xueye, 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. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050273

· 贮运保鲜 ·

不同解冻方式对鲱鱼鲜度及挥发性风味物质的影响

凌胜男¹, 刘特元^{1,*}, 陈雪叶¹, 王红丽², 王锡昌², 施文正²

(1. 劲仔食品集团股份有限公司, 湖南长沙 410000;

2. 上海海洋大学食品学院, 上海 200000)

摘要: 为了探究不同解冻方式(微波解冻、超声辅助解冻、盐水解冻、冷藏室解冻)对鲱鱼(Anchovy)鲜度及挥发性风味物质的影响, 分析了样品不同解冻方式的解冻时间、持水力、菌落总数及挥发性盐基氮(TVB-N), 同时进行了感官评价、电子鼻分析和挥发性风味物质的鉴定。结果表明: 微波解冻耗时最短(22.4 min), 微波解冻后鲱鱼持水力、菌落总数和 TVB-N 值最大, 超声辅助解冻组鲱鱼菌落总数和 TVB-N 值最小, 感官评分最高。冷藏室解冻后鱼肉气味与其它三组差距最大, 鲜度较差。经微波解冻、超声辅助解冻、盐水解冻、冷藏室解冻后鲱鱼分别鉴定出 36、41、45 和 43 种挥发性物质, 主要以醛类和醇类为主。其中, 己醛、庚醛、辛醛、壬醛、癸醛、苯乙醛、1-戊烯-3-醇、1-辛烯-3-醇、苯和三甲胺对解冻后鲱鱼总体风味形成有重要贡献。综合解冻效率、鲜度指标和挥发性风味物质, 最终确定超声辅助解冻为冷冻鲱鱼的较好的解冻方式。本研究可为鲱鱼加工、运输及综合利用提供一定的理论依据。

关键词: 鲱鱼, 解冻方式, 鲜度, 挥发性风味物质

中图分类号: TS254.8

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2022)05-0322-09

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2021050273



本文网刊:

Effect of Different Thawing Methods on the Freshness and Volatile Flavor Compounds of Anchovy (*Engraulis encrasicolus*)

LING Shengnan¹, LIU Teyuan^{1,*}, CHEN Xueye¹, WANG Hongli², WANG Xichang², SHI Wenzheng²

(1. Jinzai Food Group Co., Ltd., Changsha 410000, China;

2. College of Food Sciences & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 200000, China)

Abstract: In order to investigate the effects of different thawing methods (microwave thawing, ultrasonic-assisted thawing, saline thawing and low temperature thawing) on the freshness and volatile flavor compounds of anchovy, the thawing time, water-holding capacity, total viable counts and volatile base nitrogen (TVB-N) of the samples with different thawing methods were analyzed, and electronic nose analysis and detection of volatile flavor compounds was also performed. The results showed that the microwave thawing time was the shortest (22.4 min). Samples thawed in microwave oven maintained the largest water holding capacity, total viable counts and TVB-N value. The ultrasonic-assisted thawing group had the lowest total viable counts and TVB-N value and highest sensory score. The electronic nose could distinguish the odor of anchovy under different thawing methods. The odor of the refrigerator thawing was the biggest difference with the other three groups and the freshness was poor. 36, 41, 45 and 43 volatile compounds were identified in anchovy under four thawing methods, mainly aldehydes and alcohols. Among them, hexanal, heptanal, octanal, nonanal, decanal, phenylacetaldehyde, 1-penten-3-ol, 1-octen-3-ol, benzene and trimethylamine played an important role in the overall flavor formation

收稿日期: 2021-05-31

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFD0901006)。

作者简介: 凌胜男(1992-), 女, 硕士, 专业技术工程师, 研究方向: 食品科学, E-mail: sanlsn@163.com。

* 通信作者: 刘特元(1976-), 男, 本科, 专业技术工程师, 研究方向: 食品加工, E-mail: liuteyuan@jinzai-food.com。

of anchovy after thawing. Combined with thawing efficiency, freshness index and volatile flavor compounds, ultrasonic assisted thawing was determined to be a better thawing method for frozen anchovy. This study can provide a theoretical basis for processing, transportation and comprehensive utilization of anchovy.

Key words: anchovy; thawing methods; freshness; volatile flavor compounds

鲱鱼(*Engraulis japonicus*)属于鲱形目, 鲱科, 鲱属, 主要分布在南北半球的温带海域, 是一种常见的低值海产品且是世界范围内产量最高的单种经济鱼类^[1]。鲱鱼在我国东海和黄海分布广泛, 近十年来我国鲱鱼年捕捞量为 70 万吨左右, 其蛋白质含量高(15%~20%)、多不饱和脂肪酸和矿物质丰富、含有各种必需氨基酸, 营养价值较高^[2]。

水产品由于高水分、高蛋白及高内源酶等原料学特性, 导致其死后极易发生腐败变质^[3]。因此, 水产品捕捞后常采用冻结及后续冻藏来延长其货架期, 尤其鲱鱼个体较小(体长约 10 cm)、组织脆弱, 不适合鲜食。但是在冻结、冻藏及解冻过程中仍会发生持水性下降、脂肪氧化、蛋白质变性、风味及质构等的改变^[4-5]。解冻对于冷冻鲱鱼的后续加工至关重要, 是影响水产品最终品质的关键影响因素之一。风味是影响消费者选择和接受度的重要因素之一, 是反映食品品质的重要特征。近年来, 已有一些学者研究了不同解冻方式对水产品风味的影响。朱文慧等^[6]利用电子鼻技术对微波解冻、流水解冻、盐水电解冻等 8 种解冻方式下秘鲁鲱鱼挥发性风味成分进行有效区分。葛孟甜等^[7]研究发现经冷藏室解冻后蟹肉与冻前蟹肉的挥发性风味物质种类相似, 风味保持的最好。CAI 等^[8]比较了磁性纳米粒子结合微波解冻、冷藏室解冻和微波解冻对大口黑鲈挥发性风味物质的影响, 结果表明与新鲜样品相比, 磁性纳米粒子结合微波解冻的样品气味成分变化较小。不同解冻方式因解冻差异会对肌肉中的蛋白质、氨基酸、多肽、碳水化合物等产生不同程度的影响, 导致风味物质发生变化, 肉品呈现出不良风味, 降低其营养和商业价值。因此, 研究不同解冻方式对水产品风味的影响从而选择适宜的解冻方式对其品质具有至关重要的意义。

解冻过程是冷冻鲱鱼加工前的必要环节, 选择适宜的解冻方式对鲱鱼品质起着至关重要的作用。目前, 鲱鱼研究主要集中在麻辣休闲食品^[9]、鲱鱼蛋白粉^[10]、冻藏过程中品质变化^[11]等方面。然而, 对于不同解冻方式对鲱鱼品质影响的理论研究还较少, 尤其是关于解冻方式对鲱鱼鲜度及挥发性风味的影响研究仍是空白。本试验采取四种解冻方式(微波解

冻、超声解冻方式、盐水电解冻和冷藏室解冻)分析鲱鱼解冻过程中持水性、菌落总数、TVB-N 等鲜度变化, 同时采用电子鼻技术及顶空-固相微萃取(HS-SPME)结合气相色谱-质谱联用技术(GC-MS)对挥发性风味物质进行研究, 探究其变化规律, 旨在为鲱鱼后续高品质加工及企业高效益提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

鲱鱼 2020 年 12 月份捕捞于中国南海海域, 捕捞后 12 h 内速冻, 第二天冷链环境下(−20±1)℃运输到上海海洋大学食品学院, 立即置于冷库中用电锯进行分装(质量:(489.21±34.67)g; 体积:(753.75±4.21)cm³), 贮藏于(−20±1)℃; 营养琼脂、氯化钠、氧化镁 国药集团化学试剂有限公司。

FOX-4000 电子鼻 法国 Alpha MOS 公司; GC6890-MS5975 联用仪 美国 Agilent 公司; 手动 SPME 进样手柄、DVB/CAR/PDMS 萃取头(50/30 μm)

美国 Supelco 公司; RX6000C 彩色无纸记录仪 杭州美控自化技术有限公司; Kjelttec2300 凯氏定氮仪 丹麦 FOSS 公司; H2050R 高速冷冻离心机 长沙湘仪有限公司; M1-L202B 微波炉 黑色广东美的厨房电器制造有限公司; KQ-100VDE 型超声波清洗机 昆山市超声仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 解冻方式 将样品从−20℃冰箱中取出去包装后, 将温度传感器的探头插入鱼体中心部位, 每秒钟记录 1 个读数, 直至鱼体中心温度达到 4℃, 记为解冻终点, 监控鱼体中心温度随解冻时间的变化情况。鲱鱼的 4 种解冻方式具体操作如表 1 所示。

1.2.2 持水力的测定 参考 JIANG 等^[13]的方法并稍作修改。用厨房用纸擦干解冻后的整条鲱鱼并称重记为 m₁, 双层滤纸包裹离心 10 min (4℃, 5000 r/min), 称取离心后的质量 m₂, 按下列公式计算持水力:

$$\text{持水力}(\%) = \frac{m_2}{m_1} \times 100$$

1.2.3 菌落总数和 TVB-N 的测定 按照 GB4789.2-2016《食品安全国家标准食品微生物学检验菌落总

表 1 鲱鱼的 4 种解冻方式
Table 1 Four thawing methods for anchovy

解冻方式	操作方法
微波解冻	样品放入微波炉中, 调至“按质量解冻”模式 ^[7]
超声辅助解冻	样品置于超声清洗装置中解冻, 超声功率为 200 W, 工作频率 43 kHz, 水温(20±1)℃ ^[12]
盐水电解冻	样品置于 3.0% 食盐水中, 在水温(15±1)℃条件下解冻 ^[6]
冷藏室解冻	样品放在白色搪瓷托盘中, 置于(4±1)℃冰箱中解冻 ^[6]

数测定》进行菌落总数的测定。

使用 Kjelttec2300 自动凯氏定氮仪进行测定, 结果用 mg N/100 g 表示。

1.2.4 感官评定方法 参考王凤玉等^[14]的方法, 略作修改。依据表 2 对解冻后的鲢鱼进行感官评价。由 10 名专门经过一定感官评定培训的人员(5 男 5 女)对鲢鱼样品进行打分, 满分为 20 分。

1.2.5 电子鼻分析 电子鼻样品: 分别准确称取剁碎均匀的鲢鱼肉 1.0 g, 加入 1.0 mL 0.18 g/mL 的 NaCl 溶液(1:1 的质量比混合), 匀浆后将样品装入 10 mL 的自动进样瓶中, 进行电子鼻测试, 每组样品平行测定 8 次。

参考王红丽等^[15]的方法, 电子鼻分析条件: 流速为 150 mL/min; 载气: 合成干燥空气; 顶空产生参数中产生的温度: 50 ℃, 产生时间: 600 s; 搅动速率: 500 r/min; 顶空注射参数: 注射速率 2500 μ L/s; 注射体积 2500 μ L; 获得参数: 获得时间 120 s, 延滞时间 600 s。

1.2.6 挥发性物质成分的测定 GC-MS 样品: 分别准确称取剁碎均匀的鲢鱼肉 3 g, 与 3 mL 0.18 g/mL 的氯化钠溶液(1:1 的质量比)混合, 匀浆后将样品装入 15 mL 的自动进样瓶中, 加入 10 μ L 浓度为 10^{-5} g/mL 的内标 TMP (2, 4, 6-三甲基吡啶), 每组样品平行测定 3 次。

参考康翠翠等^[16]的方法, 略作修改。SPME 条件: 选取 DVB/CAR/PDMS 萃取头 (50/30 μ m) 在 250 ℃ 老化 30 min 后, 萃取温度和萃取时间分别在 50 ℃ 和 50 min, 随后在 250 ℃ 解吸 5 min, 用于挥发性物质分析测定。

色谱条件: HP-5MS 弹性毛细管柱 (30 m \times 0.25 mm, 0.25 μ m); 不分流模式进样; 升温程序: 柱初温 40 ℃, 保持 4 min, 以 3 ℃/min 升至 80 ℃ (保持 3 min), 而后以 5 ℃/min 升至 120 ℃ (保持 5 min); 而后以 10 ℃/min 升至 250 ℃ (保持 5 min), 进样口温度 250 ℃; 载气(He)流量 1.0 mL/min。

质谱条件: 离子源温度 (230 ℃); 四极杆温度 (150 ℃); 传输线温度 (280 ℃); 电子能量 70 eV; 质量扫描范围(m/z 35~350)。

1.2.7 挥发性风味物质定性和定量分析 将挥发性风味物质的质谱图与标准谱库(NIST 02 和 Wiley)中的质谱数据库进行定性确认, 当且仅当正反匹配度

均大于 800 的挥发性物质才予以报道^[17]。

通过计算各挥发性风味物质的面积与 TMP 面积的比值来反映挥发性风味物质的含量, 各挥发性风味物质的含量计算公式如下^[17]:

$$\text{挥发性风味物质的含量} = \frac{A_i \times C_{\text{std}} \times V_{\text{std}}}{A_{\text{std}} \times m}$$

式中: A_i 、 A_{std} 、 C_{std} 、 V_{std} 、 m 分别表示挥发性化合物的面积、内标物的峰面积、加入内标物的质量浓度(g/mL)、加入内标物的体积(μ L)和加入鱼肉的质量(g)。

1.2.8 气味活度值的计算 每个挥发性化合物的贡献用气味活度值(Ordour activity value, OAV)描述, OAV 的计算公式如下: $\text{OAV}_i = C_i/T_i$, C_i 和 T_i 分别代表挥发性风味物质的含量和其所对应的阈值, OAV 值大于 1 时定义为气味活性物质^[18]。

1.3 数据处理

实验数据以至少 3 个平行样品的平均值 \pm 标准差表示, 采用 SPSS 22.0 软件进行数据分析和 Duncan 法进行多重比较, 采用 Origin 2018(OriginLab Corp, Hampton, USA)软件绘图。电子鼻数据经系统自带的 Alphasoft V11 进行主成分分析(PCA)。

2 结果与分析

2.1 不同解冻方式对鲢鱼解冻时间的影响

不同解冻方式的鲢鱼中心温度变化如图 1 所示。从鲢鱼解冻温度曲线可以看出, 解冻过程可以分为两个阶段: 第一阶段(-20~5 ℃)解冻较快, 此过程大部分水以冰晶的形式存在, 样品与解冻介质温差大且冰的热传导大于水, 因此传热效率高解冻速率较快。第二阶段(-5~1 ℃)解冻曲线趋于平缓, 解冻速率较低, 此过程被称为最大冰晶生成带, 大部分冰晶融化, 鱼肉导热率下降, 解冻时间较长。

四种解冻方式的解冻时间差异明显, 微波解冻、超声辅助解冻、盐水解冻和冷藏室解冻所需解冻时间分别为 22.4、51.5、232.8、1270.9 min。其中, 冷藏室解冻所需时间较长(约 22 h), 热量散出较慢。而微波解冻极大缩短了解冻时间, 通过最大冰晶生成带的时间较短, 这是由于解冻过程中微波直接作用于鱼肉内部分子, 使其相互摩擦碰撞达到快速解冻的目的^[19], 但微波解冻后鱼肉表面会出现部分熟化现象。从解冻时间上得出: 微波解冻>超声辅助解冻>盐水解冻>冷藏室解冻, 微波解冻和超声辅助解冻相对较好。

表 2 鲢鱼感官评价标准

Table 2 Sensory evaluation standard for anchovy

评分(分)	5	4	3	2	1
色泽	具有明亮的光泽, 体侧为正常的银白色	光泽较明亮, 体侧为银白色	光泽稍暗淡, 鱼体侧的银白色转灰	光泽暗淡, 鱼体侧变为银灰色	无光泽, 鱼体侧发灰
组织形态	鱼肉组织完整、肌纤维非常清晰	鱼肉组织较紧密, 纹理清晰	鱼肉组织不紧密, 纹理较清晰	鱼肉组织不紧密、部分松散	鱼肉组织不紧密、呈松散状
肌肉弹性	肌肉坚实、富有弹性, 按压后凹陷立即消失	肌肉较坚实, 按压后凹陷消失	肌肉变软、弹性较差, 按压后凹陷稍晚消失	肌肉变软, 弹性较差, 按压后凹陷不易消失	无弹性, 按压后凹陷不消失

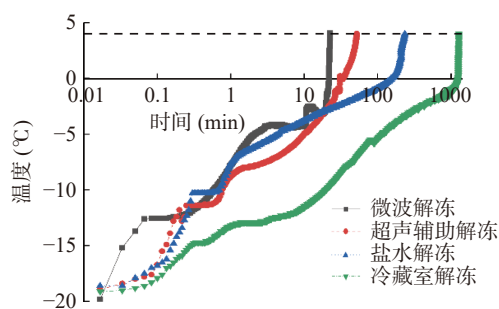


图1 鲱鱼解冻过程温度曲线

Fig.1 Thawing temperature curve of anchovy

2.2 不同解冻方式对鲱鱼持水力的影响

鲱鱼肌肉的持水性是指在外力作用下能维持内部水分不受损失的能力。由图2可知,微波解冻、超声辅助解冻、盐水解冻持水性无显著性差异($P>0.05$),冷藏室解冻持水性最差,这可能是由于冷藏室解冻时间较长,不能快速通过最大冰晶生成带($-5\sim-1^{\circ}\text{C}$),汁液流失严重,持水力较差。这与马翼飞等^[20]研究发现低温解冻小黄鱼的保水性最差的结果一致。

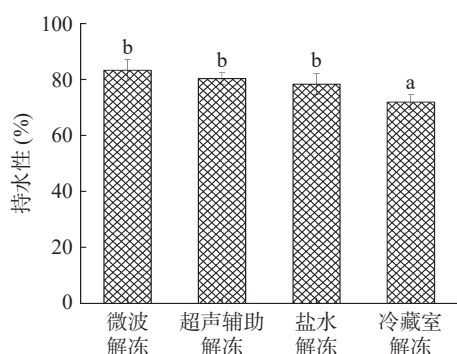


图2 不同解冻方式对鲱鱼持水性的影响

Fig.2 Effect of different thawing methods on water holding capacity of anchovy

注:不同小写字母表示差异显著($P<0.05$),图3、图4同。

2.3 不同解冻方式对鲱鱼菌落总数和 TVB-N 值的影响

由图3可知,四种解冻方式间菌落总数呈显著差异($P<0.05$),微波解冻后鱼肉菌落总数最大($2.49\lg\text{CFU/g}$),虽然微波解冻时间最短,但较高的解冻温度提高了微生物体内酶的代谢活动,导致各种

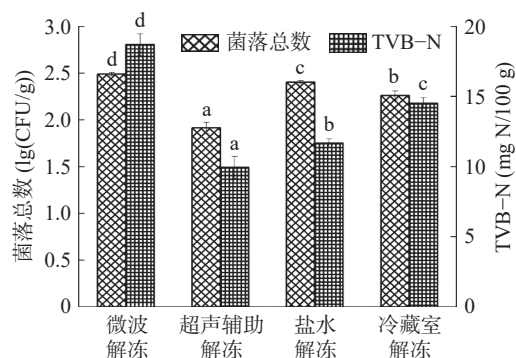


图3 不同解冻方式对鲱鱼菌落总数和 TVB-N 的影响

Fig.3 Effect of different thawing methods on total viable counts and TVB-N of anchovy

生化反应速率提高,使得解冻后鲱鱼菌落总数显著增加($P<0.05$)。超声辅助解冻后鱼肉菌落总数最小($1.91\lg\text{CFU/g}$),这可能是由于空化和机械效应可破坏微生物细胞结构,从而达到减少微生物活菌的目的,同时加上超声辅助解冻时间较短且解冻过程中产生的过氧化氢对微生物有杀灭作用,导致解冻后菌落总数较小^[21]。牛改改等^[22]研究解冻方式对牡蛎肉菌落总数的影响时发现微波解冻后菌落总数最低,与本研究结果不符,可能与样品及微波解冻参数设置有关。盐水解冻及冷藏室解冻由于较低的解冻温度有利于抑制微生物生长繁殖,可以减缓微生物对蛋白质的分解作用,解冻后菌落总数相对较小。

TVB-N 被广泛用于水产品降解及新鲜度的指标^[23]。不同解冻方式对鲱鱼 TVB-N 的影响如图3所示,四种解冻方式下 TVB-N 值差异显著($P<0.05$),其中,微波解冻后 TVB-N 值最大($18.69\text{ mg N}/100\text{ g}$),这是因为微波解冻虽然时间较短,解冻过程中受热不均匀导致不同部位蛋白质分解情况也不同。其次是冷藏室解冻和盐水解冻,超声辅助解冻后 TVB-N 值最小($9.94\text{ mg N}/100\text{ g}$)。这与翁梅芬等^[24]研究的碎虾仁结果一致。而 BOONSOMREJ 等^[23]发现冷冻斑节对虾微波解冻后 TVB-N 值最小,与本研究结果稍有不同。超声辅助解冻和盐水解冻后的样品 TVB-N 值仍处于一级鲜度范围($\text{TVB-N} \leq 13\text{ mg N}/100\text{ g}$)^[15],解冻速度较快且均匀稳定,对蛋白质的破坏性相对较小,微生物繁殖较慢。

综合菌落总数和 TVB-N 两种指标,鲱鱼经超声辅助解冻的菌落总数和 TVB-N 均较低,是最优的解冻方式。

2.4 不同解冻方式对鲱鱼感官评分的影响

感官评价是描述和判断食品品质最直观的指标,是评判其可接受程度的重要指标。如图4所示,鲱鱼经微波解冻、超声辅助解冻、盐水解冻和冷藏室解冻后感官评分分别为 11.64、14.73、14.61 和 14.53,感官评分组间无显著差异($P>0.05$)。超声辅助解冻组样品感官评分最高,微波解冻组感官评分最低。WANG 等^[25]比较了不同解冻方式对冻融循环过程

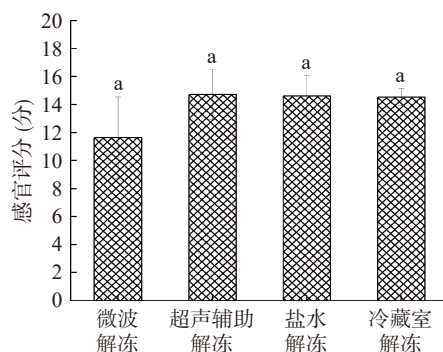


图4 不同解冻方式对鲱鱼感官评分的影响

Fig.4 Effect of different thawing methods on sensory score of anchovy

中鲤鱼品质的影响,发现微波解冻组鲤鱼感官评分最低,与本研究结果一致。超声辅助解冻、盐水解冻和冷藏室解冻组鳊鱼都具有良好的色泽、气味、组织形态和肌肉弹性。

2.5 不同解冻方式鳊鱼电子鼻分析

电子鼻传感器及其代表性敏感物质类型如表 3 所示。四种解冻方式下电子鼻传感器响应雷达图轮廓相似(图 5),其中,传感器 P30/2(硫化氢、酮)、P30/1(碳氢化合物、氨、乙醇)、PA/2(乙醇、氨水、胺类化合物)、P40/1(氟、氯)、T30/1(极性化合物、氯化氢)对鳊鱼挥发性气味响应值较高,18 根传感器对不同解冻方式下鱼肉挥发性气味响应有所差异,四种解冻方式下电子鼻传感器响应值从大到小依次排列为:

表 3 电子鼻传感器及其代表性敏感物质类型

Table 3 Sensors and corresponding representative sensitive material types

阵列序号	传感器名称	敏感物质类型
1	LY2/LG	氯、氟、氮氧化合物、硫化物
2	LY2/G	氨、胺类化合物、碳氧化合物
3	LY2/AA	乙醇、丙酮、氨
4	LY2/GH	氨、胺类化合物
5	LY2/gCTL	硫化氢
6	LY2/gCT	丙烷、丁烷
7	T30/1	极性化合物、氯化氢
8	P10/1	非极性:碳氢化合物、氨、氯
9	P10/2	非极性:甲烷、乙烷
10	P40/1	氟、氯
11	T70/2	甲苯、二甲苯、一氧化碳
12	PA/2	乙醇、氨水、胺类化合物
13	P30/1	碳氢化合物、氨、乙醇
14	P40/2	氯、硫化氢、氟化物
15	P30/2	硫化氢、酮
16	T40/2	氯
17	T40/1	氟
18	TA/2	乙醇

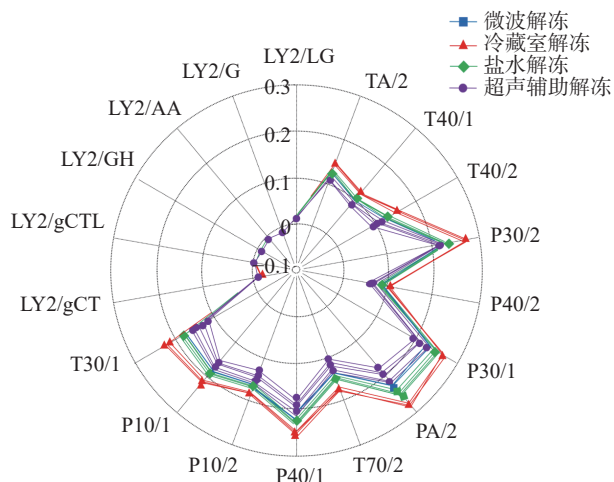


图 5 不同解冻方式下鳊鱼电子鼻响应值

Fig.5 E-nose response of anchovy under different thawing methods

冷藏室解冻>盐水解冻>微波解冻>超声辅助解冻,这可能是由于冷藏室解冻样品挥发性风味物质主成分浓度较高,不同解冻方式样品传感器响应值随温度升高而增大。而超声辅助解冻过程中温度和机械振动的双重作用会对风味前体物质产生影响,同时解冻过程中温度的升高受热不均匀造成气味物质差距稍微较大。

主成分分析是一种比较常见的降维和数据转换的统计学方法,通过从传感器网络中提取的具有最小方差信息来反应多指标信息^[26]。由图 6 可知,PC1 的方差贡献率为 96.966%,PC2 的方差贡献率为 1.625%,总贡献率达到 98.591%,且 PC1 的方差贡献率远大于 PC2,表明 PC1 对不同解冻方式下鳊鱼气味变化起决定作用且 PCA 结果能较好的反映原始样品的差异信息的完整性,可用于区分不同解冻方式下鳊鱼气味。判别指数(Discrimination Index=58)为正值,说明不同解冻方式下样品气味相互独立。冷藏室解冻与其它三种解冻方式样品气味能明显区分,而微波解冻、超声辅助解冻和盐水解冻样品距离较近,此结果与电子鼻传感器响应雷达图结果一致。刘欢等^[27]通过电子鼻手段对不同解冻方式下鲈鱼的气味进行了区分,发现鼓气流水解冻、空气解冻和静水解冻后样品气味有重叠。通过电子鼻传感器响应值及 PCA 分析得出超声辅助解冻为较适宜的鳊鱼解冻方式,其次是盐水解冻。

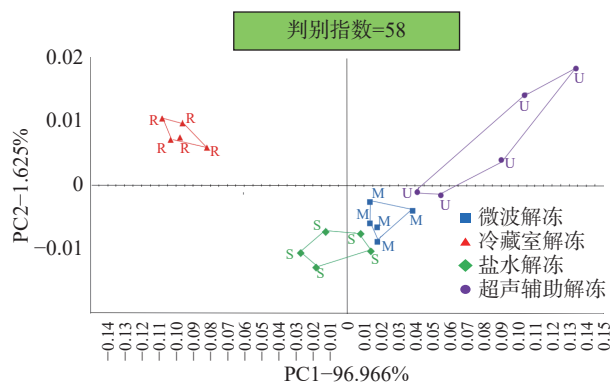


图 6 不同解冻方式下鳊鱼电子鼻 PCA 分析

Fig.6 PCA results for anchovy under different thawing methods

2.6 不同解冻方式鳊鱼挥发性风味物质的比较分析

肉制品中的风味物质主要是在加工过程中风味前体物质(氨基酸类、核苷酸类、脂类、糖类、肽类及硫胺素类等)发生的一系列复杂的反应(美拉德反应、焦糖化反应、氨基酸、硫胺素和肽的热降解及脂类物质的氧化分解)形成的^[28]。不同解冻方式下鳊鱼挥发性风味物质的种类及含量如表 4 所示。鳊鱼肉的挥发性风味物质主要有醛类、酮类、醇类、烃类、酯类及芳香族等化合物构成。经微波解冻(MT)、超声辅助解冻(UT)、盐水解冻(ST)、冷藏室解冻(RT)后鱼肉分别检测出来 36、41、45 和 43 种挥发性物质,其中醇类和烃类含量较高,其次是醛类(图 7),不

表 4 不同解冻方式下鲱鱼挥发性风味物质 GC-MS 分析结果(n=3)

Table 4 GC-MS analytical results of volatile flavor compounds for anchovy under different thawing methods (n=3)

化合物名称	阈值 (μg/kg)	含量(μg/kg)				OAV值			
		MT	UT	ST	RT	MT	UT	ST	RT
丙醛	15.1	0.83±0.07 ^b	0.80±0.09 ^a	4.21±0.99 ^d	3.60±0.28 ^c	0.06	0.05	0.28	0.24
己醛	4.5	30.33±3.89 ^a	36.46±2.89 ^b	75.57±2.90 ^c	193.90±12.99 ^d	6.74	8.10	16.79	43.09
庚醛	3	21.21±1.47 ^b	11.46±0.79 ^a	28.87±5.71 ^c	34.64±3.60 ^d	7.07	3.82	9.62	11.55
苯甲醛	350	15.76±2.73 ^b	4.38±0.94 ^a	16.82±0.92 ^c	22.12±1.01 ^d	0.05	0.01	0.05	0.06
辛醛	0.7	ND	7.43±0.87 ^a	24.62±5.37 ^b	34.23±3.04 ^c	—	10.61	35.17	48.90
壬醛	1	10.95±0.48 ^b	10.56±0.09 ^a	11.57±1.66 ^c	31.29±2.93 ^d	10.95	10.56	11.57	31.29
癸醛	2	6.04±0.74 ^b	4.15±0.99 ^a	7.03±0.43 ^c	11.42±0.85 ^d	3.02	2.08	3.52	5.71
十一醛	5	ND	0.75±0.29 ^a	2.66±0.61 ^a	2.11±0.66 ^b	—	0.15	0.53	0.42
苯乙醛	4	ND	8.96±0.89 ^b	3.54±0.12 ^a	17.70±0.65 ^c	—	2.24	0.89	4.43
(E,Z)-2,6-壬二烯醛	NA	2.63±0.17 ^b	ND	2.00±0.46 ^a	ND	—	—	—	—
羟基乙醛二甲基缩醛	NA	ND	ND	ND	3.82±0.62	—	—	—	—
(Z)-4-庚烯醛	4.2	3.14±0.44	ND	ND	ND	0.75	—	—	—
反-2-辛烯醛	NA	ND	ND	3.62±0.27	ND	—	—	—	—
2-十一烯醛	NA	ND	ND	1.03±0.09	ND	—	—	—	—
反式2,6-壬二醛	NA	ND	ND	2.35±0.07	ND	—	—	—	—
十二醛	NA	ND	ND	2.28±0.16	ND	—	—	—	—
十四醛	NA	ND	ND	2.01±0.27	ND	—	—	—	—
醛类小计		90.89	84.95	188.19	354.83	28.64	37.62	78.42	145.69
2,3-戊二酮	NA	72.81±2.97 ^a	79.19±3.07 ^b	ND	114.63±8.56 ^c	—	—	—	—
2,3-辛二酮	NA	15.75±2.27 ^b	9.72±0.84 ^a	21.72±2.86 ^c	ND	—	—	—	—
香叶基丙酮	60	ND	ND	1.25±0.09	ND	—	—	0.02	—
2,5-辛二酮	NA	ND	3.71±0.42	ND	ND	—	—	—	—
酮类小计		88.56	92.62	22.97	114.63	-	-	0.02	-
1-戊烯-3-醇	40	112.82±6.02 ^b	198.41±19.87 ^c	91.75±6.33 ^a	216.61±13.22 ^d	2.82	4.96	2.29	5.42
1-戊醇	400	ND	ND	ND	4.73±0.19	—	—	—	0.01
顺-2-戊烯-1-醇	NA	31.51±9.94 ^c	16.98±0.16 ^a	24.78±5.23 ^b	50.54±5.24 ^d	—	—	—	—
反式-2-庚烯-1-醇	NA	ND	2.74±0.75 ^a	11.23±0.08 ^c	10.62±0.87 ^b	—	—	—	—
反式-2-辛烯-1-醇	40	5.51±0.79 ^b	5.23±0.31 ^a	7.40±0.99 ^c	14.64±0.84 ^d	0.14	0.13	0.19	0.37
正己醇	250	4.73±0.69 ^b	6.81±0.70 ^c	4.45±0.86 ^a	26.43±1.74 ^d	0.02	0.03	0.02	0.11
1-辛烯-3-醇	1	84.12±9.87 ^c	43.60±6.66 ^a	45.10±3.11 ^b	136.70±9.45 ^d	84.12	43.60	45.10	136.70
2-乙基己醇	27000	15.98±2.12 ^c	0.84±0.06 ^a	ND	9.31±0.80 ^b	<0.01	<0.01	—	<0.01
正戊醇	NA	ND	2.48±0.17 ^b	2.01±0.47 ^a	ND	—	—	—	—
1-庚烯-3-醇	NA	ND	ND	4.87±0.44 ^a	7.10±0.29 ^b	—	—	—	—
反-2-戊醇	NA	9.74±0.78 ^b	1.93±0.35 ^a	ND	ND	—	—	—	—
2,7-辛二醇	NA	158.37±12.60 ^a	ND	ND	239.73±3.70 ^b	—	—	—	—
5,7-十二烷二炔-1,12-二醇	NA	ND	ND	ND	0.26±0.05	—	—	—	—
2-(甲基氨基)-1-苯基-1-丙醇	NA	ND	ND	ND	0.32±0.06	—	—	—	—
2-十六烷醇	NA	1.33±0.03 ^b	1.00±0.03 ^a	2.44±0.57 ^c	8.75±9.14 ^d	—	—	—	—
2,7-辛二烯-1-醇	NA	ND	87.46±3.84 ^a	177.44±16.14 ^b	ND	—	—	—	—
反式-2-癸烯醇	NA	ND	ND	1.80±0.11 ^a	2.31±0.06 ^b	—	—	—	—
顺式-3-辛烯醇	NA	ND	ND	ND	3.56±0.17	—	—	—	—
顺式-4-庚烯醇	NA	ND	ND	6.07±0.52	ND	—	—	—	—
3,7,11-三甲基-1-十二烷醇	NA	ND	1.00±0.03	ND	ND	—	—	—	—
4-乙基-1-辛炔-3-醇	NA	4.48±0.33	ND	ND	ND	—	—	—	—
醇类小计		428.58	368.49	379.34	731.60	87.10	48.72	47.60	142.61
3-甲基戊烷	NA	ND	ND	ND	2.31±0.05	—	—	—	—
正己烷	NA	7.68±0.28 ^a	ND	10.79±0.85 ^b	27.78±1.17 ^c	—	—	—	—
十四烷	NA	7.66±0.10 ^a	7.72±0.99 ^b	9.18±0.58 ^c	12.24±1.02 ^d	—	—	—	—
十五烷	NA	210.74±8.92 ^a	312.132±30.47 ^b	432.89±10.12 ^c	519.09±9.12 ^d	—	—	—	—
十六烷	NA	117.99±5.98 ^d	7.56±0.18 ^a	10.76±0.09 ^b	15.83±0.64 ^c	—	—	—	—
十七烷	NA	14.74±1.33 ^a	19.08±2.84 ^b	20.37±2.42 ^c	25.36±0.33 ^d	—	—	—	—

续表 4

化合物名称	阈值 (μg/kg)	含量(μg/kg)				OAV值			
		MT	UT	ST	RT	MT	UT	ST	RT
2,6,10,14-四甲基十五烷	NA	68.42±4.25 ^a	79.25±2.11 ^b	100.29±7.57 ^c	173.02±3.45 ^d	—	—	—	—
1-十五烯	NA	ND	1.76±0.06	ND	ND	—	—	—	—
9,10-环氧-1,5-环十二烷二烯	NA	ND	ND	ND	2.65±0.60	—	—	—	—
烃类小计		427.23	427.51	584.28	778.28	—	—	—	—
十四酸甲酯	NA	ND	ND	ND	11.48±0.11	—	—	—	—
棕榈酸甲酯	NA	7.68±0.92 ^b	ND	2.60±0.50 ^a	8.39±0.07 ^c	—	—	—	—
棕榈油酸甲酯	NA	ND	2.38±0.38	ND	ND	—	—	—	—
1-甲基-4-(1-甲基乙烯基)环己醇乙酸酯	NA	10.83±0.60 ^b	ND	ND	7.11±0.38 ^a	—	—	—	—
3-甲基苯酚甲酯	NA	ND	ND	1.71±0.51	ND	—	—	—	—
花生四烯酸甲酯	NA	0.48±0.07 ^a	0.65±0.09 ^b	3.42±0.02 ^d	2.14±0.70 ^c	—	—	—	—
(Z)-十六烯酸甲酯	NA	1.27±0.19 ^a	ND	ND	6.12±0.31 ^b	—	—	—	—
14-甲基十五烷酸甲酯	NA	ND	4.01±0.69 ^b	4.70±0.07 ^c	3.61±0.24 ^a	—	—	—	—
12-甲基十三烷酸甲酯	NA	5.40±0.64 ^b	ND	3.03±0.25 ^a	ND	—	—	—	—
邻苯二甲酸正丁辛酯	NA	0.61±0.06 ^b	0.34±0.08 ^a	4.45±0.54 ^c	6.46±0.20 ^d	—	—	—	—
肉豆蔻酸甲酯	NA	ND	10.02±0.42 ^b	8.97±0.11 ^a	ND	—	—	—	—
邻苯二甲酸二异丁酯	NA	ND	10.20±0.23	ND	ND	—	—	—	—
9-十六碳烯酸乙酯	NA	ND	1.41±0.45	ND	ND	—	—	—	—
十三烷二酸环乙撑酯	NA	ND	0.57±0.09	ND	ND	—	—	—	—
10-甲基十一烷酸甲酯	NA	1.16±0.63	ND	ND	ND	—	—	—	—
十四酸甲酯	NA	11.18±0.82	ND	ND	ND	—	—	—	—
酯类小计		38.61	29.57	28.87	45.31	—	—	—	—
苯	8.8	28.02±2.36 ^a	38.39±5.25 ^b	62.23±4.43 ^c	174.17±8.27 ^d	3.18	4.36	7.07	19.79
3-乙基甲苯	NA	ND	2.66±0.60	ND	ND	—	—	—	—
异丙苯	NA	ND	ND	3.57±0.19	ND	—	—	—	—
三甲胺	0.37	4.18±0.25 ^c	1.56±0.23 ^b	0.83±0.03 ^a	5.95±0.12 ^d	11.29	4.22	2.24	16.08
其它小计		32.20	42.61	66.63	180.12	14.47	8.58	9.31	35.87

注: MT、UT、ST、RT分别代表微波解冻、超声辅助解冻、盐水解冻、冷藏室解冻; NA(not available)表示阈值没有查到; ND (not detected)表示未检出; “—”表示OAV无法计算出; 同行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

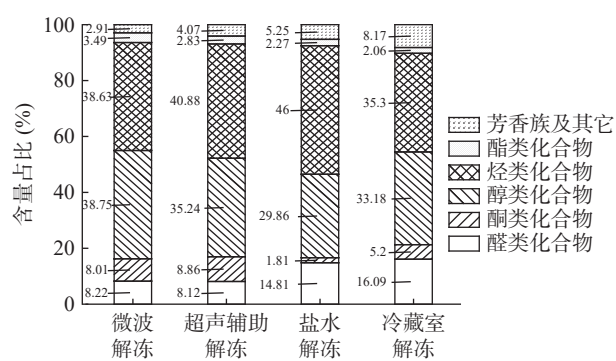


图 7 不同解冻方式对鳀鱼挥发性风味物质含量占比的影响

Fig.7 Effect of different thawing methods on percentage content of volatile flavor compounds of anchovy

同解冻方式下鳀鱼挥发性化合物的种类和含量存在差异。OAV 计算结果表明,四种解冻方式下分别检测出 8、10、9、10 种气味活性物质($OAV>1$),具体包括:己醛、庚醛、辛醛、壬醛、癸醛、苯乙醛、1-戊烯-3-醇、1-辛烯-3-醇、苯和三甲胺。不同解冻方式对鳀鱼风味影响不同,微波解冻过程中较高的解冻温度加速了美拉德反应和硫胺素的热降解及脂类物质的氧化降解;超声辅助解冻过程中温度和机械振动的双重作用会对风味前体物质产生影响;盐水解冻由于解冻损失会伴随风味前体物质水溶性游离氨基酸和肽类

物质的减少;冷藏室解冻过程中较低的温度对风味前体物质有延缓作用^[29]。因此,选择合适的解冻方式对鳀鱼肉风味至关重要。

2.6.1 醛类化合物 作为脂质氧化的产物醛类化合物由于其阈值较低,对鳀鱼整体气味贡献较大。经四种解冻方式(MT、UT、ST、RT)解冻后分别检测到 8、9、15、10 种醛类化合物,醛类化合物挥发性风味物质的总含量分别为 90.89、84.95、188.19 和 354.83 μg/kg,其含量分别占总含量 8.22%、8.12%、14.81% 和 16.09%,其中,四种解冻方式下,己醛(鱼腥味、青草味)、庚醛(鱼腥味、青草味)、壬醛(油脂味)和癸醛(甜香和柑橘香)含量均较高,且是气味活性物质($OAV>1$)。鳀鱼解冻后的 C6~C10 饱和直链醛主要来自于不饱和脂肪酸的氧化降解^[30]。本研究中己醛含量最高,气味活度值最大,说明己醛对鳀鱼整体风味形成贡献较大。康翠翠等^[16]的研究表明己醛对不同冻结方式下草鱼的风味贡献较大。冷藏室解冻后样品醛类含量最高,超声辅助解冻含量最近,可能由于低温环境有利于醛类风味前体物质的降解,这与余力等^[29]的研究结果一致。(Z)-4-庚烯醛仅在微波解冻组被检出,说明高温加快了脂质氧化速度。

2.6.2 酮类化合物 由表 4 和图 7 可知,酮类化合物

主要来源于氨基酸的降解、醇类的氧化及不饱和脂肪酸的降解^[29],其种类和含量均较低,阈值较高,对解冻后鲢鱼的气味贡献不大,可能对鲢鱼整体风味起到一定程度的修饰或增强作用^[31]。有研究表明烯酮类化合物对鱼肉的腥味有一定的增强作用^[16]。

2.6.3 醇类化合物 相比于饱和醇,较低的阈值使得不饱和醇对鲢鱼风味贡献较大,主要来源于脂肪酸氢过氧化物降解和醛酮类化合物的还原,一般具有泥土味和植物芳香^[16]。经微波解冻、超声辅助解冻、盐水解冻和冷藏室解冻后鲢鱼分别萃取出 10、12、12、15 种醇类化合物,醇类化合物挥发性风味物质的总含量分别为 428.58、368.49、379.34 和 731.60 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 占有物质总量的 38.75%、35.24%、29.86% 和 33.18%。OAV>1 的气味活性物质只有 1-戊烯-3 醇和 1-辛烯-3-醇,其中具有青草味和蘑菇味的 1-辛烯-3-醇含量最高,四种解冻方式下 OAV 分别为 84.12、43.60、45.10 和 136.70,它主要来源于亚油酸氢过氧化物的降解,对解冻后鲢鱼的挥发性风味物质贡献较大。1-戊烯-3 醇在许多鱼肉中也有报道,具有泥土味^[32]。葛孟甜等^[7]发现不同解冻方式后冷冻蟹肉挥发性醇类风味物质中 1-辛烯-3-醇含量最高,与本研究结果相同。鲢鱼经四种解冻方式后醇类化合物的种类和含量存在差异,可能由于不同解冻机制对醇类物质还原为醛和酮的影响程度不同。

2.6.4 烃类化合物 从解冻后鲢鱼中检测到另一种种类和含量丰富的是烃类化合物,由于其高阈值,烃类化合物对鲢鱼整体气味贡献性可能很小,它主要是通过脂质自氧化过程从烷基自由基中衍生产生的,对肉类风味的提升可能有一定提升作用^[33-34]。由图 7 可知,经微波解冻、超声辅助解冻、盐水解冻和冷藏室解冻后鲢鱼烃类化合物分别占挥发性化合物总量的 38.63%、40.88%、46.00% 和 35.3%。

2.6.5 芳香族和其它化合物 鲢鱼解冻后酯类化合物占比较小(2.06%~3.49%),说明对鱼肉风味整体贡献度不大。四种方式解冻后均检测到苯和三甲胺,含量较高且均为气味活性物质,其中冷藏室解冻组 OAV 值最高,说明对这两种物质对鲢鱼风味的形成影响较大。苯具有较强的化学刺激味,可能来自于解冻过程中鱼肉中苯丙氨酸和酪氨酸等的降解,与鲢鱼所生存的环境也相关^[17]。具有鱼腥味的三甲胺对鲢鱼气味影响也显著。鲢鱼经 4 种解冻方式处理后的挥发性风味化合物存在差异主要与解冻机制有关,风味物质的种类和含量因解冻条件(温度、水分等)而发生改变。

冷冻鲢鱼经过四种解冻方式处理后挥发性风味物质种类和含量存在差异,主要与解冻机制有关。不同解冻方式因解冻条件如温度、水分等对肌肉中风味前体物质破坏程度不同,导致其风味发生变化。饱和直链醛和醇类化合物是解冻后鲢鱼主要的挥发性化合物,通常有令人不愉快的气味(鱼腥味和青草味等),在超声辅助解冻组样品中检测到的含量最低。

综合挥发性风味物质的分析,超声辅助解冻为鲢鱼最优的解冻方式。

3 结论

研究表明,不同解冻方式对冷冻鲢鱼鲜度和挥发性风味物质有一定影响。解冻所需时间排列如下:微波解冻>超声辅助解冻>盐水解冻>冷藏室解冻。经冷藏室解冻后鲢鱼持水力最差,其它三种解冻方式无显著差异($P>0.05$)。超声辅助解冻后鲢鱼的 TVB-N 值和菌落总数最小,对蛋白质的破坏性相对较小,能较好地控制鲢鱼微生物数量,而经微波解冻后 TVB-N 值和菌落总数最大。电子鼻能对四种解冻方式下鲢鱼肉挥发性风味进行区分,四种解冻方式下电子鼻传感器响应值从大到小依次排列为:冷藏室解冻>盐水解冻>微波解冻>超声辅助解冻。SPME-GC-MS 表明经微波解冻、超声辅助解冻、盐水解冻和冷藏室解冻后鲢鱼分别检测到 8、10、9、10 种气味活性物质(OAV>1),超声辅助解冻组样品中检测到的饱和直链醛和醇类化合物含量最低,挥发性风味物质保持较好。综上所述,超声辅助解冻是冷冻鲢鱼最适宜的解冻方式。本研究数据为鲢鱼今后加工、运输及综合利用等提供理论依据。

参考文献

- [1] SHIRISKAR D A, KHEDLKAR G D, SUDHAKARA N S. Preparation of boiled and dried products from anchovies (*Stolephorus* sp) and studies on quality changes during storage[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2010, 34: 73-86.
- [2] 刘海珍, 罗琳, 蔡德陵, 等. 不同生长阶段鲢鱼肌肉营养成分分析与评价[J]. *核农学报*, 2015, 29(11): 2150-2157. [LIU H Z, LUO L, CAI D L, et al. Analysis and valuation of nutrient components in the muscle of *Engraulis japonicus* at different growth stages [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2015, 29(11): 2150-2157.]
- [3] WANG H L, ZHU Y, ZHANG J, et al. Study on changes in the quality of grass carp in the process of postmortem[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2018, 42(6): 1-12.
- [4] LI D, ZHAO H, MUHAMMAD A I, et al. The comparison of ultrasound-assisted thawing, air thawing and water immersion thawing on the quality of slow/fast freezing bighead carp (*Aristichthys nobilis*) fillets[J]. *Food Chemistry*, 2020, 320: 126614.
- [5] BENGKULU S, VISESSANGUAN W, THONGKAEW C, et al. Comparative study on physicochemical changes of muscle proteins from some tropical fish during frozen storage[J]. *Food Research International*, 2003, 36(8): 787-795.
- [6] 朱文慧, 宦海珍, 步营, 等. 不同解冻方式对秘鲁鲉鱼肌肉品质和风味特性的影响[J]. *食品研究与开发*, 2019(18): 84-89. [ZHU W H, HUAN H Z, BU Y, et al. Effects of different thawing methods on quality and flavor characteristics of *dosidicus gigas*[J]. *Food Research and Development*, 2019(18): 84-89.]
- [7] 葛孟甜, 李肖婵, 林琳, 等. 不同解冻方式对早熟蟹肉理化性质及挥发性风味物质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(8): 105-113. [GE M T, LI X C, LIN L, et al. Effects of different thawing methods on physicochemical properties and volatile flavor compounds of precocious crabmeat[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2019, 10(8): 105-113.]

- [8] CAI L, CAO M, CAO A, et al. The effect of magnetic nanoparticles plus microwave thawing on the volatile flavor characteristics of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) fillets[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2019, 12(8): 1340–1351.
- [9] 陈君, 霍健聪. 麻辣鳀鱼休闲食品的研制[J]. *食品工业*, 2011, 32(9): 80–82. [CHEN J, HUO J C. Study on instant food of spicy-hot flavor anchovy[J]. *Food Industry*, 2011, 32(9): 80–82.]
- [10] 高志中. 鳀鱼蛋白粉制备工艺研究[D]. 舟山: 浙江海洋学院, 2011. [GAO Z Z. Study on the preparation technology of anchovy protein powder[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2019.]
- [11] AYDIN I, GOKOGLU N. Effects of temperature and time of freezing on lipid oxidation in anchovy (*Engraulis encrasicolus*) during frozen storage[J]. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2014, 116(8): 996–1001.
- [12] LI H, HU Y, ZHAO X, et al. Effects of different ultrasound powers on the structure and stability of protein from sea cucumber gonad[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 137(1): 110403.
- [13] JIANG Q, JIA R U, NAKAZAWA N, et al. Changes in protein properties and tissue histology of tuna meat as affected by salting and subsequent freezing[J]. *Food Chemistry*, 2019, 271(15): 550–560.
- [14] 王凤玉, 曹荣, 赵玲, 等. 解冻方式对冷冻秋刀鱼品质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2015, 6(11): 4584–4590. [WANG F Y, CAO R, ZHAO L, et al. Effects of thawing methods on quality of *Coloabis saira*[J]. *Journal of Food Safety and Quality*, 2015, 6(11): 4584–4590.]
- [15] 王红丽. 草鱼死后贮藏过程中品质变化研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2019. [WANG H L. Study on changes in the quality of grass carp in the process of postmortem[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2019.]
- [16] 康翠翠, 施文正, 方林, 等. 不同冻结方式对草鱼肉挥发性成分的影响[J]. *食品科学*, 2018, 39(14): 229–235. [KANG C C, SHI W Z, FANG L, et al. Effects of different freezing methods on the volatile components of grass carp meat[J]. *Food Science*, 2018, 39(14): 229–235.]
- [17] 顾赛麒, 郑皓铭, 戴王力, 等. 不同食盐添加量对腌制草鱼品质和风味的影响[J]. *浙江工业大学学报*, 2020, 48(4): 455–465. [GU S Q, ZHENG H M, DAI W L, et al. Effect of salt content on the quality and flavor of salted grass carp[J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2020, 48(4): 455–465.]
- [18] ZHOU X, CHONG Y, DING Y, et al. Determination of the effects of different washing processes on aroma characteristics in silver carp mince by MMSE-GC-MS, e-nose and sensory evaluation[J]. *Food Chemistry*, 2016, 207: 205–213.
- [19] 崔瑾. 冷冻鱼的微波解冻方法研究[D]. 大连: 大连工业大学. 2012. [CUI J. Study on the method of microwave thawing frozen fish[D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2012.]
- [20] 马翼飞, 刘欢, 单钱艺, 等. 不同解冻方式对小黄鱼品质的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(1): 222–228. [MA Y F, LIU H, SHAN Q Y, et al. Effect of different thawing methods on the quality of little yellow croaker[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(1): 222–228.]
- [21] 杜鹏飞, 汝医, 孙蓓, 等. 超声波解冻对羊肉品质的影响[J]. *肉类研究*, 2020, 34(1): 39–44. [DU P F, RU Y, SUN B, et al. Effect of ultrasonic thawing on quality characteristics of frozen mutton[J]. *Meat Science*, 2020, 34(1): 39–44.]
- [22] 牛改改, 秦成丰, 游刚, 等. 解冻方式对近江牡蛎肉感官特征和理化指标的影响[J]. *食品工业科技*, 2020, 41(16): 271–278. [NIU G G, QIN C F, YOU G, et al. Effects of thawing methods on sensory characteristics and physicochemical indexes of oyster meat[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2020, 41(16): 271–278.]
- [23] BOONSUMREJ S, CHAIWANICH SIRI S, TANTRATIAN S, et al. Effects of freezing and thawing on the quality changes of tiger shrimp (*Penaeus monodon*) frozen by air-blast and cryogenic freezing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2007, 80(1): 292–299.
- [24] 翁梅芬, 邰延军, 樊明明, 等. 不同解冻方式对碎虾仁品质特性的影响[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(16): 162–166. [WENG M F, HUAN Y J, FAN M M, et al. Influence of different thawing methods on the quality of shrimp pieces meat[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(16): 162–166.]
- [25] WANG H, LUO Y, SHI C, et al. Effect of different thawing methods and multiple freeze-thaw cycles on the quality of common carp (*Cyprinus carpio*) [J]. *Journal of Aquatic Food Product Technology*, 2015, 24(2): 153–162.
- [26] GANHO R, ESTEVEZ M, MORCUENDE D. Suitability of the TBA method for assessing lipid oxidation in a meat system with added phenolic-rich materials[J]. *Food Chemistry*, 2011, 126(2): 772–778.
- [27] 刘欢, 陈雪, 宋立玲, 等. 不同解冻方式对鲈鱼鲜度及品质的影响[J]. *食品科学*, 2016, 37(10): 259–265. [LIU H, CHEN X, SONG L L, et al. Effect of different thawing methods on freshness and quality of *Scomber japonicus* [J]. *Food Science*, 2016, 37(10): 259–265.]
- [28] 秦刚. 荣昌猪肉在不同烤制温度中挥发性风味物质的研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011. [QIN G. Study on the aroma compounds of Rongchang pork at different core temperature in processing[D]. Chongqing: Southwest University, 2011.]
- [29] 余力, 贺雅非, 王兆明, 等. 不同解冻方式对伊拉兔肉挥发性风味物质的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(22): 95–101. [YU L, HE Z F, WANG Z M, et al. Effect of different thawing methods on volatile flavor compounds of hyla rabbit meat[J]. *Food Science*, 2015, 36(22): 95–101.]
- [30] SABIO E, VIDAL-ARAGON M C, BERNALTE M J, et al. Volatile compounds present in six types of dry-cured ham from south European countries[J]. *Food Chemistry*, 1998, 61(4): 493–503.
- [31] XIE J, SUN B, ZHENG F, et al. Volatile flavor constituents in roasted pork of mini-pig[J]. *Food Chemistry*, 2008, 109(3): 506–514.
- [32] IGLESIAS J, MEDINA I. Solid-phase microextraction method for the determination of volatile compounds associated to oxidation of fish muscle[J]. *Journal of Chromatography A*, 2008, 1192(1): 9–16.
- [33] FU X, XU S, ZHANG W. Kinetics of lipid oxidation and off-odor formation in silver carp mince: The effect of lipoxygenase and hemoglobin[J]. *Food Research International*, 2009, 42(1): 85–90.
- [34] EDWARDS R A, ORDONEZ J A, DAINTY R H. Characterization of the headspace volatile compounds of selected Spanish dry fermented sausages[J]. *Food Chemistry*, 1999, 64(4): 461–465.