

不同解冻方式对干制武昌鱼品质及挥发性风味的影响

杜 柳^{1,2}, 邱文兴^{1,2}, 王世哲^{1,2}, 刘栋银¹, 邓 祎^{1,2}, 熊光权¹,
乔 宇^{1*}, 吴文锦^{1*}, 汪 兰¹, 汪 超²

(1. 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 武汉 430068;
2. 湖北工业大学生物工程与食品学院, 武汉 430064)

摘 要: 目的 研究不同解冻方式对武昌鱼干制前后品质及挥发性风味的影响。**方法** 通过电子鼻及气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)等技术分析 4 种解冻方式对干制武昌鱼风味的影响。结合理化指标(脂肪含量、蛋白含量、色度、硫代巴比妥酸值)的测定结果, 综合评价不同解冻方式对干制武昌鱼的品质。**结果** 电子鼻能够很好地区分 4 种解冻方式对干制前后武昌鱼气味差异, 静水解冻武昌鱼能够较大保留武昌鱼的原始气味, 结合 GC-MS 结果, 静水解冻武昌鱼干制后风味差异主要来源于醛、醇类物质的贡献。研究发现, 较其他解冻方式, 静水解冻不仅所需时间较少, 且汁液流失率较低; 静水解冻后干制武昌鱼的蛋白质含量最高, 低温解冻后干燥武昌鱼的脂肪含量最高; 静水解冻干制大幅度增加了武昌鱼的 a^* , 给予干制武昌鱼良好的色泽, 并且对氧化具有一定的抑制作用, 通过自然解冻干制后对武昌鱼的 b^* 具有显著抑制作用。**结论** 综合分析静水解冻较其他 3 种解冻方式更利于干制武昌鱼的品质及风味的形成。

关键词: 武昌鱼; 解冻方式; 电子鼻; 气相色谱-质谱法; 挥发性风味物质; 品质

Effects of different thawing methods on the quality and volatile flavor of dried Wuchang fish

DU Liu^{1,2}, QIU Wen-Xing^{1,2}, WANG Shi-Zhe^{1,2}, LIU Dong-Yin¹, DENG Yi^{1,2},
XIONG Guang-Quan¹, QIAO Yu^{1*}, WU Wen-Jin^{1*}, WANG Lan¹, WANG Chao²

(1. Institute of Agricultural Products Processing and Nuclear Agriculture Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430068, China; 2. School of Food and Biological Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430064, China)

ABSTRACT: Objective To study the effects of different thawing methods on the quality and volatile flavor of Wuchang fish before and after drying. **Methods** The effects of 4 kinds of thawing methods on the flavor of dried Wuchang fish were analyzed by electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). According to

基金项目: 湖北省农机装备补短板核心技术应用攻关项目(HBSNYT202221)、湖北省技术创新专项重大项目(2020BBA048)

Fund: Supported by the Hubei Provincial Agricultural Equipment Shortcut Core Technology Application Tackling Project (HBSNYT202221), and the Major Program of Technical Innovation of Hubei Province (2020BBA048)

***通信作者:** 乔 宇, 研究员, 主要研究方向为农产品加工与贮藏。E-mail: qiaoyu412@sina.com

吴文锦, 副研究员, 主要研究方向为农产品加工与贮藏。E-mail: wuwenjin@hbaas.com

***Corresponding author:** QIAO Yu, Profssor, Institute of Agricultural Products Processing and Nuclear Agriculture Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430068, China. E-mail: qiaoyu412@sina.com.

WU Wen-Jin, Associate Profssor, Institute of Agricultural Products Processing and Nuclear Agriculture Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430068, China. E-mail: wuwenjin@hbaas.com

the results of physicochemical index (fat content, protein content, colorimetry, thiobarbituric acid value), the quality of dried Wuchang fish by different thawing methods was evaluated comprehensively. **Results** The electronic nose was able to distinguish well the differences in odor of Wuchang fish before and after drying by the 4 kinds of thawing methods. Hydrostatic thawing of Wuchang fish was able to retain more of the original odor of Wuchang fish, and combined with the GC-MS results, the flavor differences of hydrostatic thawing of Wuchang fish after drying mainly came from the contribution of aldehydes and alcohols. It was found that compared with other thawing methods, hydrostatic thawing not only required less time and had lower juice loss rate; the protein content of dried Wuchang fish was highest after hydrostatic thawing, and the fat content of dried Wuchang fish was highest after low-temperature thawing; hydrostatic thawing and drying substantially increased the a^* of Wuchang fish, gave good color to dried Wuchang fish, and had a certain inhibitory effect on oxidation, and had a significant inhibitory effect on b^* of Wuchang fish after drying by natural thawing. **Conclusion** Comprehensive analysis shows that hydrostatic thawing is more favorable to the quality and flavor formation of dried Wuchang fish than the other 3 kinds of thawing methods.

KEY WORDS: Wuchang fish; thawing method; electronic nose; gas chromatograph-mass spectrometry; volatile flavor substances; quality

0 引言

武昌鱼, 学名团头鲂(*Megalobrama amblycephala*), 产自湖北省鄂州, 是重要的淡水鱼养殖品种之一。武昌鱼作为我国特有的优良淡水鱼类, 其营养丰富、口感上佳、味道鲜甜, 深受消费者的喜爱^[1]。

冷冻处理在食品的加工运输过程中必不可少, 冷冻食品在市场上需求量也呈逐年上升趋势^[2], 不同的冷冻方式对肉质品质的影响巨大^[3]。冷冻食品在食用前需要进行解冻处理, 水产品在解冻过程中也会对品质造成一定程度的影响。传统解冻方式有自然(空气)解冻、静水解冻、流水解冻、低温解冻等; 新型解冻方式有超声解冻、微波解冻、射频解冻、高压静电场解冻等^[4-5]。目前对于不同类型解冻方式对肉质影响的研究较多, 如余文辉等^[6]研究空气解冻、静水解冻、流水解冻和微波解冻对金枪鱼品质的影响, 结果表明, 静水解冻的色泽质地最佳; 李念文等^[7]通过测定解冻时间、持水率、巯基值等研究空气解冻、真空解冻、微波解冻和超声波解冻大目金枪鱼块解冻后的品质变化的影响, 结果表明真空解冻方式最适合金枪鱼块的解冻; DINCER 等^[8]比较了冷藏解冻、水解冻和微波解冻后对鱼肉新鲜度的影响, 结果表明微波解冻后鱼肉的挥发性碱基总氮(total volatile basic nitrogen, TVB-N)值最低, 综合评价水解冻为鱼肉理想的解冻方式; ZHOU 等^[9]研究流水解冻、超声波流水解冻、空气解冻、微波解冻、低温解冻等方式解冻对鲭鱼蛋白氧化及脂肪氧化性的影响, 结果表明流水解冻具有较好的保水性及抑制氧化。但从挥发性风味物质结合理化变化的相关研究较少。

鉴于此, 本研究通过电子鼻技术和气相色谱-质谱法(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)测定关键

性理化指标综合分析不同解冻方式(自然解冻、静水解冻、超声解冻、低温解冻)对干制前后武昌鱼品质的影响, 为进一步明确不同解冻方式对干制前后武昌鱼品质的影响提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

原料为 400 g±50 g 的武昌鱼, 样品购于武汉市洪山区武商量贩农科城店。

乙醇、氯化钠、三氯乙酸(trichloroacetic acid, TCA)、冰乙酸、氢氧化钠、硫代巴比妥酸(thiobarbituric acid reaction substances, TBARS)、硫代硫酸钠、石油醚(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司)。

1.2 仪器与设备

KQ5200DE 超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司); 722N 可见分光光度计(上海仪电分析仪器有限公司); JHK-A 净化工作台(天津市中环实验电炉有限公司); 7890A-5975C GC-MS 仪(美国 Agilent Technologies 公司); TGL-24MC 台式高速冷冻离心机(长沙平凡仪器仪表有限公司); DHG-9920A 电热鼓风干燥箱(上海—恒科学仪器有限公司); GL224-1SCN 分析天平(感量 0.1 mg, 广州市深华生物技术有限公司); CR-400 色差仪(日本柯尼卡美能达有限公司); PEN3 电子鼻(德国 AIRSENSE 公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 样品处理

干燥前样品处理: 将购买的新鲜武昌鱼开背、去鳞、去内脏, 并清洗干净分别装入保鲜袋中放进-18℃冷库中备用, 24 h 内进行解冻; 将冻结好的武昌鱼取出按表 1 中不

同方式进行解冻处理, 测量背部中心温度至 4℃即为解冻终点, 记录解冻时间。

干燥后样品处理: 将解冻结束后的样品放入 60℃热风干燥箱内干燥水分降至 55%左右, 取出待测。

表 1 不同解冻方式的处理方法

Table 1 Processing methods of different thawing methods

解冻方式	处理方法
自然解冻	将武昌鱼放入托盘中置于室温条件下进行解冻
静水解冻	将武昌鱼浸泡在水池中进行解冻
超声解冻	将武昌置于超声清洗器中浸泡解冻 (频率 40 kHz 功率 80 W)
低温解冻	将武昌鱼放入托盘中置于 4℃冷藏柜中解冻

1.3.2 蛋白质含量的测定

参照 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》采用第一法凯氏定氮法进行测定。

1.3.3 脂肪含量的测定

参照 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》采用第一法索氏抽提法进行测定。

1.3.4 解冻损失率的测定

参考 XIA 等^[10]的方法, 先称取解冻前的武昌鱼质量记为(m_1)后, 待解冻完成后用吸水纸吸干武昌鱼体表及腹部水分, 再次称取质量记为(m_2), 解冻损失率计算公式(1)为。

$$\text{解冻损失率}/\% = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\%$$

(1)

1.3.5 硫代巴比妥酸值的测定

参考 SALIH 等^[11]的方法稍作修改, 称取 4 g 样品于 50 mL 离心管中, 加入 20 mL 20% TCA 和 16 mL 水, 在冰水浴中用高速分散机以 3000 r/min 匀浆 60 s, 静置 1 h, 然后在 3000 r/min、4℃条件下离心 10 min、过滤, 滤液用去离子水定容到 50 mL, 取 5 mL 滤液加 5 mL 0.02 mol/L TBARS 在沸水浴中反应 20 min, 取出, 用流动水冷却 5 min, 于 532 nm 波长处测定吸光度。空白样: 取 20 mL 20% TCA 用去离子水定容到 50 mL, 取 5 mL 滤液加 5 mL TBARS。TBARS 值的测定以丙二醛(malonic dialdehyde, MDA)为标准品, 结果以每 kg 样品中 MDA 的毫克数来表示, 记为 mg/kg。

1.3.6 色度的测定

将武昌鱼背部皮剖开, 使用色差仪的光源为 D65, 孔径为 8 mm 测定鱼背剖面的 L^* 、 a^* 、 b^* , L^* 、 a^* 、 b^* 分别表示鱼肉的亮度、红度和黄度。对仪器进行校准, 每组样品测 5 次, 取平均值进行计算。

1.3.7 电子鼻的测定

称取 2 g 样品装入 PEN3 便携式电子鼻系统配套的集样瓶中, 同时加入 2%的盐水和转子进行搅拌采集, 每组采集 3 个样品, 水浴 40℃加热 30 min, 仪器预热 30 min, 测

量参数为测量时间 120 s, 清洗时间 100 s, 每 1 s 取样一次, 选用 116~120 s 的值进行主成分分析(principal component analysis, PCA)。

1.3.8 挥发性风味物质的测定

参考周明珠等^[12]的方法并加以修改。准确称取样品 2 g 放入顶空瓶中, 于磁力搅拌水浴锅中旋转 10 min, 用活化好的萃取头顶空吸附 40 min。吸附完毕插入 GC-MS 进样口解吸 5 min, 每个样品进行 3 次平行。

GC 条件: 进样口温度 40℃, 升温程序: 110℃保持 4 min, 以 10℃/min 升温到 160℃并保持 1min、最后以 5℃/min 升到 240℃并保持 15 min, 载气为氦气, 流量为 1.52 mL/min。

MS 条件: 接口温度 280℃, 四极杆温度 150℃, 离子源温度 230℃;

定性分析: 采用 GC-MS 仪进行分析鉴定。分析结果在计算机谱库(NIST08)进行初步检索, 最后确认挥发性物质的化学组成。

1.4 统计分析方法

数据最少重复 3 次测定, 数据间差异通过统计软件 DPS(9.01 版)中的 Duncan 新复极差法进行方差分析和多重比较, 结果以平均值±标准偏差表示, 作图采用 Origin 2021 软件进行绘制。

2 结果与分析

2.1 不同方式解冻武昌鱼所需时间及损失率

如表 2, 不同方式解冻武昌鱼所需的时间及解冻损失率都存在显著差异性, 其中超声辅助解冻所需时间最短, 但损失率最大(3.20%), 分析可能由于超声振动, 分子加速运动产热缩短解冻时间, 同时超声破坏鱼肉的组织结构, 导致肌肉组织间的汁液大量流失。低温解冻所需时间最长, 但损失率最小(2.25%), 最大限度保留解冻武昌鱼汁液的流失, 分析低温环境导致鱼肉内酶活性受到抑制, 并且冻结时形成的冰晶在低温慢速解冻过程中融化成液态水被细胞重新吸收, 从而降低了其汁液的损失^[13-14]。静水解冻较自然解冻, 不仅缩短了解冻时间又降低了汁液损失率, 水具有较高的比热容, 从而加快热交换速率^[15], 减少解冻时间。

表 2 不同方式解冻武昌鱼所需时间表

Table 2 Schedule required for thawing Wuchang fish by different methods

解冻方式	自然解冻	静水解冻	超声解冻	低温解冻
时间/min	115.33±5.29 ^b	31.67±1.00 ^c	26.33±3.06 ^c	1383.66±16.44 ^a
损失率/%	2.73±0.10 ^b	2.52±0.28 ^{bc}	3.20±0.16 ^a	2.25±0.06 ^c

注: 不同小写字母表示不同处理方式之间显著差异($P<0.05$), 下同。

2.2 不同解冻方式对干制武昌鱼营养成分的影响

蛋白质含量和脂肪含量是评定水产品营养价值的重要指标,如表 3,较新鲜鱼肉对比,通过不同方式解冻对武昌鱼干制前蛋白质含量无显著影响,而对脂肪含量具有显著性影响,特别通过低温解冻武昌鱼的脂肪含量显著降低,不同方式解冻武昌鱼进行干燥后显著提高了蛋白质含量,静水解冻后干燥武昌鱼的蛋白质含量最高,低温解冻后干燥武昌鱼的脂肪含量最高,而超声处理组蛋白质含量和脂肪含量最低,可能是由于解冻过程中超声对蛋白结构进行破坏,促进蛋白水解,也可能由于超声振动破坏细胞膜导致汁液过度损失^[16]。

2.3 不同解冻方式对干制武昌鱼的色度的影响

色泽是判断水产品肉质新鲜度的一个重要指标^[17],其中蛋白质的降解、脂肪的氧化均会对水产品的色泽产生一定因素的影响^[18]。不同的解冻方式对鱼肉内水分流失不同而导致的色泽差异,并且干制前后色泽的差异主要来源于水分含量的变化。如表 4,较新鲜样,干制前不同方式解冻对武昌鱼色泽具有一定影响,低温解冻提高了武昌鱼的 a^* ,超声解冻显著提高了武昌鱼的 L^* ,其中超声解冻大幅度的降低了武昌鱼的 a^* ,而低温解冻提高了武昌鱼的 a^* ,可能由于低温解冻较超声解冻过程,更大程度的保护肌红蛋白结构或低温解冻过程延缓肌红蛋白的氧化^[19],不同方式解冻对武昌鱼肉 b^* 并无显著性的影响。较新鲜武昌鱼干制结果对比,通过不同方式解冻对武昌鱼亮度存在抑制作用,对 a^* 有促进作用,特别是通过静水解冻干制大幅度增加了武昌鱼的 a^* ,给干制武昌鱼带来需要的色泽。

2.4 不同解冻方式对干制武昌鱼 TBARS 值的影响

脂质氧化会生成共轭二烯、氢过氧化物等初级氧化产物,而后续会生成醛酮类等次级产物,用 TBARS 测定次级氧化产物,反映水产品脂肪氧化程度^[20],数值越大说明脂

肪氧化越严重^[21]。如图 1,较新鲜组,不同方式解冻明显提高武昌鱼肉的氧化,其中低温解冻对干制前武昌鱼的氧化具有一定的抑制作用^[22-23]。对比干制前后,不同方式解冻后干燥会大幅度加剧氧化。较新鲜武昌鱼干燥结果,通过静水解冻后干燥武昌鱼的氧化得到抑制作用,可能由于浸泡水中避免空气接触而减少氧化,而超声辅助解冻干制后大幅度加速氧化,可能由于组织结构受损加快氧化自由基的进攻,从而加速氧化。

2.5 不同解冻方式对干制武昌鱼气味特征的影响

电子鼻是通过模拟人的嗅觉功能所建立的一种精密的仪器,能够快速、高效、准确地检测出其挥发性气体,通过 Winmuster 软件进行 PCA。PCA 能反映不同热加工熟化虾肉在气味上的差异,一般各样品之间的距离越远,表明样品间的气味差异越显著^[24]。

如图 2,干燥前电子鼻主成分分析中,第一主成分的贡献率为(93.65%),第二主成分的贡献率为(4.12%),总贡献率为(97.77%),贡献率越高越能反映原始指标的信息^[25],不同方式解冻武昌鱼的气味差异主要呈现在第一主成分上,主要以自然解冻与超声解冻对武昌鱼的气味影响最大,且两者间存在部分重合,具有少部分相同气味,而静水解冻武昌鱼气味差异最小,说明静水解冻能够最大保留武昌鱼的原始气味。

如图 3,干燥后电子鼻主成分分析中,第一主成分贡献率为(78.20%),第二主成分贡献率为(16.97%),其总贡献率为(95.17%)。在第一主成分上除了自然解冻武昌鱼的气味存在差异,其他解冻方式主要在第二主成分上存在差异,其中静水解冻后干燥对武昌鱼的气味影响最为显著(对第二主成分的贡献最大),研究发现静水解冻武昌鱼在干燥前后气味产生巨大改变。

表 3 不同方式解冻干制前后武昌鱼营养成分的影响
Table 3 Effects of different thawing methods on the nutrient composition of Wuchang fish before and after drying

名称		自然解冻	静水解冻	超声解冻	低温解冻	新鲜
蛋白质含量/%	干制前	15.53±0.34 ^{ab}	15.57±0.85 ^{ab}	16.87±0.17 ^a	15.44±0.59 ^b	15.87±0.34 ^{ab}
	干制后	25.75±0.06 ^d	30.47±0.10 ^c	25.10±0.15 ^a	27.90±0.13 ^b	24.42±0.11 ^c
脂肪含量/%	干制前	4.26±0.58 ^a	3.15±0.46 ^{abc}	2.60±0.11 ^{bc}	1.94±0.17 ^c	3.44±0.80 ^{ab}
	干制后	3.77±0.64 ^{ab}	4.88±0.36 ^a	2.98±0.15 ^b	5.05±0.57 ^a	4.10±0.52 ^{ab}

表 4 不同解冻方式对干制前后武昌鱼色度的影响
Table 4 Effects of different thawing methods on the coloration of Wuchang fish before and after drying

名称/色度		自然解冻	静水解冻	超声解冻	低温解冻	新鲜
L^*	干制前	54.65±2.12 ^{ab}	54.54±3.88 ^{ab}	56.25±3.43 ^a	54.36±1.11 ^{ab}	47.69±4.00 ^b
	干制后	61.92±8.38 ^a	57.44±3.33 ^a	66.46±7.46 ^a	57.65±4.12 ^a	72.30±0.62 ^a
a^*	干制前	0.960.26 ^{ab}	1.09±0.62 ^{ab}	-0.01±0.47 ^b	1.82±0.65 ^a	1.13±1.05 ^{ab}
	干制后	5.33±5.28 ^a	9.16±2.81 ^a	5.96±4.05 ^a	5.26±2.62 ^a	3.59±1.80 ^a
b^*	干制前	-1.58±0.43 ^a	-2.09±0.75 ^a	-2.27±0.83 ^a	-0.43±1.21 ^a	-1.89±0.36 ^a
	干制后	8.97±4.48 ^a	14.32±1.20 ^a	11.55±1.97 ^a	13.11±1.23 ^a	13.66±2.83 ^a

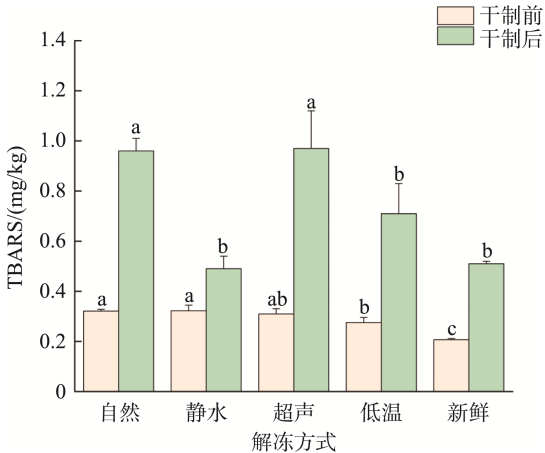


图 1 不同解冻方式对干制前后武昌鱼 TBARS 值的影响
Fig.1 Effects of different thawing methods on TBARS values of Wuchang fish before and after drying

2.6 不同解冻方式对干制前后武昌鱼挥发性风味物质的影响

如表 5, 干制前新鲜武昌鱼中共检测出 15 种挥发性风味物质, 通过自然解冻、静水解冻、超声解冻、低温解冻后分别检测出 8 种、21 种、14 种、11 种挥发性风味物质, 除了通过静水解冻武昌鱼提高了挥发性风味物质含量, 特别是通过自然解冻处理武昌鱼内风味物质流失最为显著, 与干制前电子鼻气味差异趋势一致, 静水解冻最大程度保留了武昌鱼的原始风味, 而自然解冻武昌鱼导致大量原始风味的损失。绝大多数低分子有机化合物都能贡献香味, 常见的有醛类、酮类、醇类、酯类、烷烃类和吡嗪类等, 新鲜武昌鱼内未检测出醛类物质, 说明氧化程度很低, 与 TBARS 测定结果相一致, 水产品中醛类化合物主要来源于多不饱和脂肪酸的氧化裂解而形成, 一般单独的醛类具有刺鼻性

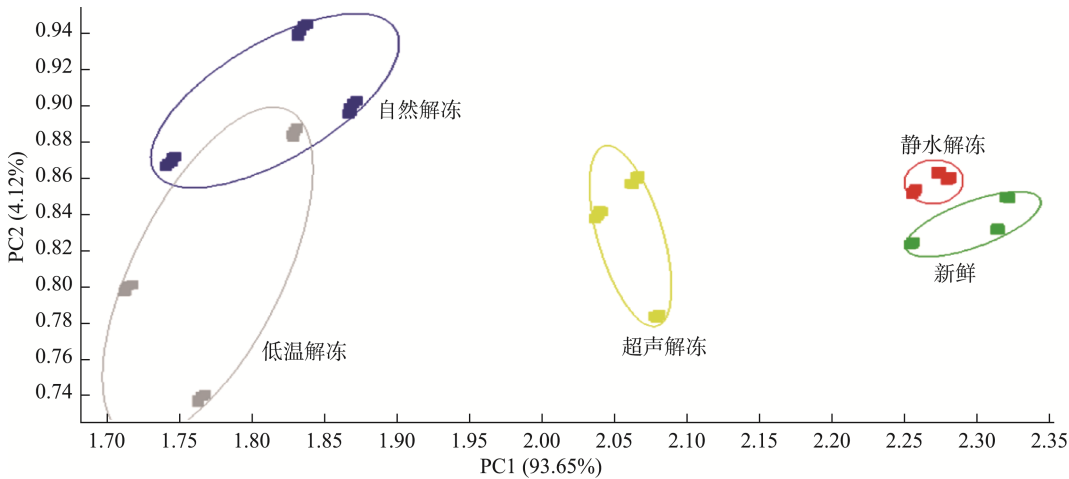


图 2 不同解冻方式武昌鱼干制前电子鼻主成分分析
Fig.2 Principal component analysis of e-nose of Wuchang fish before drying by different thawing methods

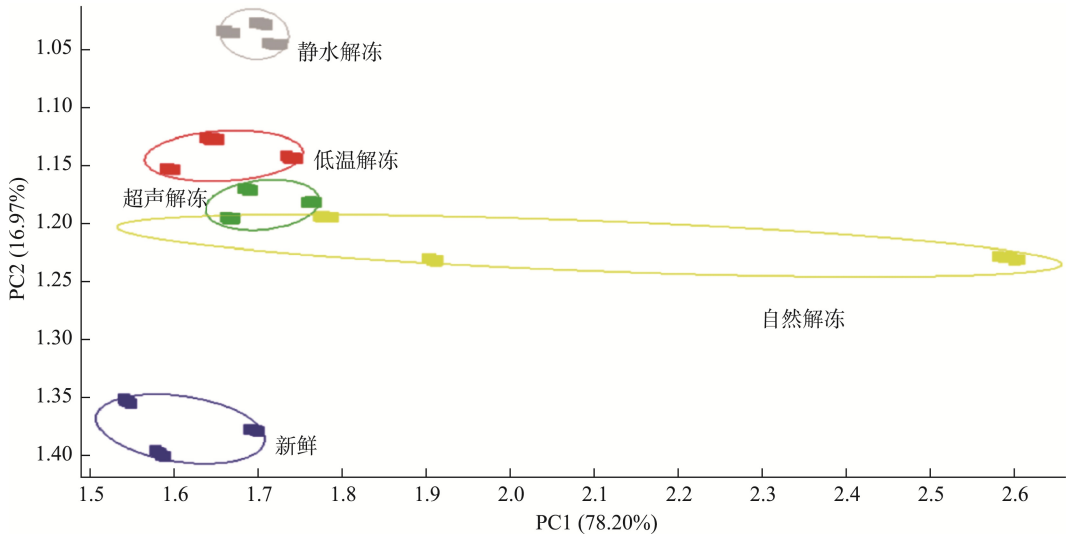


图 3 不同解冻方式武昌鱼干制后电子鼻主成分分析
Fig.3 Principal component analysis of e-nose of Wuchang fish after drying by different thawing methods

气味而微量的醛类促使香味更加的醇厚。并且醛酮类风味物质大多是脂类在热降解过程中的产物^[26]，在生鲜及冷冻武昌鱼中检测含量较少，酯类的种类和含量比较少，但大多能给食品带来清甜的果香味^[27]，烷烃类物质阈值较高对风味贡献度很低。新鲜武昌鱼中醇类物质较多，大部分醇类物质具有清新的香味，醇类物质阈值较低，对风味贡献较大^[28]，通过静水解冻后武昌鱼内醇类物质保留最多。

如表 6，干制后对比干制前显著增加了武昌鱼内风味物质的种类及含量，新鲜武昌鱼中检测出 25 种挥发性风味

物质，通过自然解冻、静水解冻、超声解冻、低温解冻干制后分别检测出 29 种、30 种、30 种、25 种挥发性风味物质。通过干制后明显增加了醛、酮、醇类风味物质，1-辛烯-3-醇、正己醇和己醛含量增加最为显著，从而导致不同方式解冻武昌鱼干制前后的风味差异变化。研究发现通过静水解冻干制武昌鱼内的醛、醇物质含量最高，而超声解冻干制武昌鱼内的酮类物质含量最高，主要以不饱和醇为主，不饱和醇阈值低^[29]，对风味贡献大，具有泥土香气和青草味^[30-31]，大多数酮类物质阈值偏高，对风味贡献小，但腥味可叠加。

表 5 不同方式解冻武昌鱼干制前挥发性风味物质的含量
Table 5 Content of volatile flavor substances in Wuchang fish before drying by thawing in different ways

保留时间/min	挥发性风味物质	峰面积×10 ⁶ (干制前)				
		自然解冻	静水解冻	超声解冻	低温解冻	新鲜
4.51	2-氨基丁烷	-	65.44	63.01	1.35	-
7.41	2,2,4,6,6-五甲基庚烷	-	-	-	4.00	-
5.30	正戊烷	-	230.77	-	-	-
12.70	十二烷	-	5.99	-	-	-
19.83	十四烷	-	4.38	-	-	-
8.18	环十二烷	-	2.97	-	-	5.37
	烷烃总和	-	309.55	63.01	5.35	5.37
13.24	双戊烯	3.94	-	3.61	-	-
14.11	右旋萘二烯	-	7.24	-	3.28	21.39
15.05	苯并环丁烯	-	3.32	-	-	-
	烯烃类总和	3.94	10.56	3.61	3.28	21.39
18.36	正己醇	6.44	11.10	6.37		
22.18	1-辛烯-3-醇	28.23	48.66	28.08	34.33	21.13
36.35	2-乙基己醇	5.32	14.26	2.74	7.84	14.36
27.13	正辛醇	-	48.81	10.14	15.93	30.19
32.12	正壬醇	-	52.15	10.07	12.80	57.89
15.92	异戊醇	-	-	-	4.92	7.39
7.10	乙醇	-	64.18	-	-	5.59
4.29	环丁醇	8.65	-	-	-	-
32.11	1-壬醇	26.08	-	-	-	-
13.01	2-氨基-1-丙醇	-	-	-	-	9.61
13.55	2-甲基-1-丁醇	-	-	-	-	4.16
	醇类总和	74.72	239.16	57.4	75.82	150.32
14.98	3-辛酮	-	3.31	-	-	4.76
19.95	壬醛	-	11.69	-	-	
22.35	乙酸	-	12.20	4.83	-	7.34
4.61	五氟丙酸己酯	-	-	-	8.62	-
4.95	甲酸辛酯	19.21	-	-	-	-
	酯类总和	19.21	-	-	8.62	-
36.58	草酰胺	-	-	34.26	-	-
36.92	丙酰胺	-	-	13.58	-	-
37.50	N,N-二丁基甲酰胺	-	9.64	3.72	-	-
40.25	N-甲基吡咯	5.07	12.81	7.97	10.11	-
36.11	萘	-	10.55	6.71	-	3.58
36.77	甲氧基胍	-	412.47	122.89	49.53	208.45
41.09	2,6-二叔丁基对甲酚	-	4.00	-	-	4.77

注: -表示未检出, 下同。

表 6 不同方式解冻武昌鱼干制后挥发性风味物质的含量
Table 6 Content of volatile flavor substances in dried Wuchang fish after thawing in different ways

保留时间/min	挥发性风味物质	峰面积×10 ⁶ (干制后)				
		自然解冻	静水解冻	超声解冻	低温解冻	新鲜
4.56	1,1,3-三甲基环己烷	-	-	25.93	-	-
5.72	2,2,4,4-四甲基辛烷	-	15.55	-	-	-
7.41	2,2,4,6,6-五甲基庚烷	67.74	151.38	141.78	8.91	26.83
8.18	癸烷	3.22	4.74	3.18	-	3.74
8.50	七甲基壬烷	6.69	-	14.88	-	-
11.75	3-甲基十一烷	-	5.64	6.88	-	-
12.69	十二烷	-	-	6.29	-	-
19.73	十四烷	6.00	-	-	-	-
28.74	二十烷	-	4.26	-	-	-
	烷烃总和	83.65	181.57	198.94	8.91	30.57
13.08	双戊烯	23.06	-	23.06	-	-
15.05	苯乙烯	10.71	10.24	12.85	4.33	7.77
14.11	右旋萜二烯	-	14.67	-	23.10	13.57
21.63	1-十四烯	3.58	-	-	-	-
	烯烃总和	37.35	24.91	35.91	27.43	21.34
7.11	乙醇	37.24	32.57	51.88	40.50	72.25
14.89	正戊醇	55.80	54.60	37.07	24.69	17.71
15.92	异戊醇	22.05	25.44	119.09	28.87	159.27
12.29	1-戊烯-3-醇	-	19.85	12.87	8.94	-
22.18	1-辛烯-3-醇	157.30	170.38	115.40	124.46	63.25
18.39	正己醇	207.13	236.31	97.93	103.40	84.60
22.51	庚醇	10.17	12.26	7.98	6.35	6.34
23.96	2-乙基己醇	9.87	12.99	10.69	7.24	-
27.13	正辛醇	11.02	10.77	-	6.77	10.90
26.62	八甘醇	1.40	5.15	-	-	-
	醇类总和	511.98	580.32	452.91	351.22	414.32
11.95	2-丁酮	-	-	5.93	-	2.92
12.80	2-庚酮	29.62	36.64	25.81	3.98	-
15.96	2-辛酮	5.05	5.89	42.27	-	16.50
17.21	3-辛酮	6.92	8.42	-	5.57	6.14
16.32	3-羟基-2-丁酮	-	12.52	98.24	16.46	9.09
17.10	2,3-辛二酮	31.90	-	11.44	8.71	-
	酮类总和	73.49	63.47	183.69	34.72	34.65
6.80	3-甲基丁醛	22.84	15.98	25.17	25.01	24.11
6.75	2-甲基丁醛	-	-	-	4.19	4.60
10.19	己醛	75.43	96.25	-	70.23	19.17
25.74	苯甲醛	29.51	20.70	9.06	13.19	17.61
19.91	壬醛	30.41	43.17	-	9.41	22.26
16.15	正辛醛	-	14.51	-	-	-
	醛类总和	158.19	190.61	34.23	122.03	87.75
22.35	乙酸	10.08	6.71	20.04	10.37	5.44
32.63	异戊酸	6.85	5.78	11.67	23.63	11.37
	酸类总和	16.93	12.49	31.71	34	16.81
4.07	2-甲基丁酸乙酯	-	-	1.86	-	-
4.65	庚酸烯丙酯	-	-	4.24	-	-
4.95	甲酸辛酯	-	-	11.81	-	-
	酯类总和	-	-	17.91	-	-
36.77	甲氧基肟	240.31	252.81	307.54	259.60	178.27
38.52	2-正戊基呋喃	19.15	28.42	16.57	10.50	9.18
4.45	二甲基二硫	5.76	-	-	10.79	7.04

3 结 论

本研究探讨了 4 种不同解冻方式及不同解冻方式干制前后对武昌鱼品质和挥发性风味的影响, 研究发现静水解冻不仅缩短了武昌鱼解冻时间且减少汁液损失率; 低温解冻对武昌鱼的脂肪含量影响巨大, 通过干制后又显著提高武昌鱼的脂肪含量, 静水解冻干制有助于保留武昌鱼中蛋白质含量; 通过静水解冻有助于提高干制武昌鱼的 a^* , 产生所需求的色泽变化; 低温解冻能有效抑制氧化而静水解冻能有效抑制干制后武昌鱼得氧化; 通过 PCA 分析, 干制前静水解冻组与新鲜武昌鱼组气味最为相近, 而干制后, 在第二主成分上与新鲜组区分最为明显, 静水解冻能够有效得保留武昌鱼得原始气味, 而通过干制后能够显著提高武昌鱼的风味; 通过分析 GC-MS 图, 新鲜鱼肉中主要以醇类物质为主, 静水解冻最大程度的保留了武昌鱼内的醇类物质, 通过干制后显著增加了鱼肉内的醛、酮、醇类物质的含量, 特别通过静水解冻干制后鱼肉内醛、醇类物质含量最大, 通过超声解冻干制后鱼肉内酮类物质含量最高, 本研究为进一步明确不同解冻方式对干制前后武昌鱼品质的影响提供理论依据和参考。

参考文献

- [1] 刘静泊, 陈季旺, 夏文水, 等. 风干武昌鱼的营养及挥发性成分[J]. 食品科学, 2015, 36(18): 80–84.
LIU JB, CHEN JW, XIA WS, *et al.* Nutrition and volatile composition of air-dried wuchang fish [J]. Food Sci, 2015, 36(18): 80–84.
- [2] 朱文博, 陈永福. 世界和中国肉类消费及展望[J]. 农业展望, 2018, 14(3): 98–109.
ZHU WB, CHEN YF. World and Chinese meat consumption and outlook [J]. Agric Outlook, 2018, 14(3): 98–109.
- [3] 张亚瑾, 焦阳. 冷冻和解冻技术在水产品中的应用研究进展[J]. 食品与机械, 2021, 37(1): 215–221, 236.
ZHANG YJ, JIAO Y. Research progress in the application of freezing and thawing technology in aquatic products [J]. Food Mach, 2021, 37(1): 215–221, 236.
- [4] 刘瑜, 李保国. 解冻技术在肉制品中的应用研究进展[J]. 包装工程, 2021, 42(5): 65–72.
LIU Y, LI BG. Research progress on the application of defrosting technology in meat products [J]. Packag Eng, 2021, 42(5): 65–72.
- [5] 胡晓亮, 王易芬, 郑晓伟, 等. 水产品解冻技术研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(29): 39–46.
HU XL, WANG YF, ZHENG XW, *et al.* Research progress of fish thawing technology [J]. Chinese Agric Sci Bull, 2015, 31(29): 39–46.
- [6] 余文晖, 王金锋, 谢晶. 不同解冻方式对金枪鱼品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(12): 189–197.
YU WH, WANG JF, XIE J. Effect of different thawing methods on the quality of tuna [J]. Food Ferment Ind, 2019, 45(12): 189–197.
- [7] 李念文, 谢晶, 周然, 等. 大目金枪鱼外部与内部解冻法的品质变化[J]. 食品工业科技, 2013, 34(16): 84–87, 90.
LI NW, XIE J, ZHOU R, *et al.* Quality changes in the external and internal thawing method of halibut tuna [J]. Sci Technol Food Ind, 2013, 34(16): 84–87, 90.
- [8] DINCER T, CADUN A, TOLASA S, *et al.* Effects of different thawing methods on the freshness quality of fish [J]. Su Ürünleri Dergisi, 2015, 26(4): 253–256.
- [9] ZHOU PC, XIE J. Effect of different thawing methods on the quality of mackerel (*Pneumatophorus japonicus*) [J]. Food Sci Biotechnol, 2021, 30(9): 1213–1222.
- [10] XIA FX, KONG BH, LIU J, *et al.* Influence of different thawing methods on physicochemical changes and protein oxidation of porcine longissimus muscle [J]. LWT-Food Sci Technol, 2012, 46(1): 280–286.
- [11] SALIH AM, SMITH DM, PRICE JF, *et al.* Modified extraction 2-thiobarbituric acid method for measuring lipid oxidation in poultry-Sciencedirect [J]. Poultry Sci, 1987, 66(9): 1483–1488.
- [12] 周明珠, 熊光权, 乔宇, 等. 克氏原螯虾不同可食部位风味成分分析[J]. 肉类研究, 2020, 34(9): 52–58.
ZHOU MZ, XIONG GQ, QIAO Y, *et al.* Flavor composition analysis of different edible parts of crayfish [J]. Meat Res, 2020, 34(9): 52–58.
- [13] 杨明远, 姜晶丹, 谢晶, 等. 解冻方式对乌鳢品质的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(5): 913–921.
YANG MY, JIANG JD, XIE J, *et al.* Effect of thawing method on the quality of snakeheads [J]. J Shanghai Ocean Univ, 2021, 30(5): 913–921.
- [14] 林墨, 李官浩, 杨慧娟, 等. 不同解冻方式对猪肉食用品质的影响[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(4): 666–671.
LIN M, LI GH, YANG HJ, *et al.* Effect of different thawing methods on the eating quality of pork [J]. Zhejiang J Agric, 2018, 30(4): 666–671.
- [15] 沈玉, 黄卉, 吴燕燕. 5 种鸚鵡鳃解冻方法对品质影响的比较研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2014, 5(12): 4092–4096.
SHEN Y, HUANG H, WU YY. A comparative study of the effect of five methods of thawing Iris squid on quality [J]. J Food Saf Qual, 2014, 5(12): 4092–4096.
- [16] 邱泽慧, 郑尧, 王锡昌. 解冻方式对养殖暗纹东方鲀持水性及质构特性的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(17): 56–63.
QIU ZH, ZHENG Y, WANG XC. Effect of thawing method on the water-holding and textural properties of cultured *P. orientalis* [J]. Food Sci, 2022, 43(17): 56–63.
- [17] KONO S, KON M, ARAKI T, *et al.* Effects of relationships among freezing rate, ice crystal size and color on surface color of frozen salmon fillet [J]. J Food Eng, 2017, 214: 158–165.
- [18] 韩恩泽, 王利强, 王岱, 等. 鱼皮蛋白酶解液复合膜对冷藏鲈鱼肉品质的影响[J]. 包装工程, 2021, 42(13): 100–104.
HAN ENZ, WANG LQ, WANG D, *et al.* Effect of fish skin proteolytic solution composite film on the quality of frozen sea bass meat [J]. Packag Eng, 2021, 42(13): 100–104.
- [19] 王雪松, 谢晶. 不同解冻方式对冷冻竹荚鱼品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(23): 137–143.

- WANG XS, XIE J. Effect of different thawing methods on the quality of frozen mackerel [J]. *Food Sci*, 2020, 41(23): 137–143.
- [20] LEE MA, TAE KY, HWANG KE, *et al.* Extracts as inhibitors of colour deterioration and lipid oxidation in raw ground pork meat during refrigerated storage [J]. *J Sci Food Agric*, 2018, 99(6): 2735–2742.
- [21] 常妮妮, 马俪珍, 杨梅, 等. 开背调味鱼不同储藏温度下的品质变化[J]. *保鲜与加工*, 2020, 20(5): 60–66.
- CHANG YN, MA LZ, YANG M, *et al.* Quality changes of open-back seasoned fish at different storage temperatures [J]. *Storage Process*, 2020, 20(5): 60–66.
- [22] 侯晓荣, 米红波, 茅林春. 解冻方式对中国对虾物理性质和化学性质的影响[J]. *食品科学*, 2014, 35(4): 243–247.
- HOU XR, MI HB, MAO LC. Effect of thawing method on physical and chemical properties of Chinese shrimp [J]. *Food Sci*, 2014, 35(4): 243–247.
- [23] 张莉, 孙佳宁, 朱明睿, 等. 不同解冻方式对哈萨克羊肉脂质及蛋白质氧化的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2022, 40(2): 161–171.
- ZHANG L, SUN JN, ZHU MR, *et al.* Effect of different thawing methods on lipid and protein oxidation of Kazakh lamb [J]. *J Food Sci Technol*, 2022, 40(2): 161–171.
- [24] FRANKEL EN. Volatile lipid oxidation products [J]. *Progress Lipid Res*, 1983, 22(1): 1–33.
- [25] 王福田, 杨冰, 鲁玉凤, 等. 不同蒸煮方式青蟹肌肉感官品质分析和比较研究[J]. *肉类研究*, 2021, 35(6): 28–36.
- WANG FT, YANG B, LU YF, *et al.* Analysis and comparative study on the sensory quality of green crab muscle by different steaming methods [J]. *Meat Res*, 2021, 35(6): 28–36.
- [26] 郑读, 白婵, 熊光权, 等. ^{60}Co - γ 射线辐照对鳙鱼品质及挥发性物质的影响[J]. *食品安全质量检测学报*, 2022, 13(8): 2457–2464.
- ZHENG D, BAI C, XIONG GQ, *et al.* Effect of ^{60}Co - γ radiation on quality and volatile substances of monopterus albus [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(8): 2457–2464.
- [27] 张娜, 袁信华, 过世东, 等. 中华绒螯蟹挥发性物质的研究[J]. *食品与发酵工业*, 2008, 34(3): 141–144.
- ZHANG N, YUAN XH, GUO SD, *et al.* Study of volatile substances in the Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. *Food Ferment Ind*, 2008, 34(3): 141–144.
- [28] SUN YW, ZHANG Y, SONG HL. Variation of aroma components during frozen storage of cooked beef balls by SPEM coupled with GC-O-MS [J]. *J Food Process Preserv*, 2020, 45(6): 26–85.
- [29] 李冬生, 李阳, 汪超, 等. 不同加工方式的武昌鱼鱼肉中挥发性成分分析[J]. *食品工业科技*, 2014, 35(23): 49–53.
- LI DS, LI Y, WANG C, *et al.* Analysis of volatile components in fish flesh of Wuchang fish with different processing methods [J]. *Food Ind Technol*, 2014, 35(23): 49–53.
- [30] 杨阳, 施文正, 汪之和. 加热温度对南美白对虾挥发性成分的影响[J]. *食品科学*, 2015, 36(22): 126–130.
- YANG Y, SHI WZ, WANG ZH. Effect of heating temperature on the volatile composition of South American white shrimp [J]. *Food Sci*, 2015, 36(22): 126–130.
- [31] SUN YW, ZHANG Y, SONG HL. Variation of aroma components during frozen storage of cooked beef ball by SPEM coupled with GC-O-MS [J]. *J Food Process Preserv*, 2020, 45(6): 26–85.

(责任编辑: 韩晓红 张晓寒)

作者简介



杜 柳, 硕士研究生, 主要研究方向为农产品加工与贮藏。

E-mail: dl17762808009@163.com

乔 宇, 研究员, 主要研究方向为农产品加工与贮藏。

E-mail: qiaoyu412@sina.com

吴文锦, 副研究员, 主要研究方向为农产品加工与贮藏。

E-mail: wuwenjin@hbaas.com