

# 不同风干工艺处理的武昌鱼鱼肉品质和风味的变化

邓祎<sup>1,2</sup>, 陈方雪<sup>1,2</sup>, 杜柳<sup>1,2</sup>, 乔宇<sup>2\*</sup>, 吴文锦<sup>2\*</sup>, 李冬生<sup>1</sup>, 刘继平<sup>3</sup>

(1 湖北工业大学生物工程与食品学院, 湖北武汉 430068) (2. 湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 农业农村部农产品冷链物流技术重点实验室, 湖北武汉 430064)

(3. 湖北省富农食品工业园有限公司, 湖北鄂州 436001)

**摘要:** 以腌制武昌鱼为原料进行干制, 通过测定热泵干燥、热风干燥、冷风干燥、联合干燥四种风干工艺处理下的武昌鱼鱼肉脂质氧化理化指标, 感官, 色泽, 质构特性, 电子鼻, 挥发性风味成分变化, 分析不同干燥工艺处理对武昌鱼品质特性和风味变化的影响。热泵干燥的武昌鱼脂质氧化程度更显著, 初级产物氢过氧化物含量最高为 4 mmol/kg, 脂质氧化二级产物丙二醛含量最高为 0.68 mg/kg, 感官评分结果最好 (8.6 分)、质构表现最好; 冷风干燥处理的武昌鱼色泽表现最差, 热风、热泵、联合干燥处理的武昌鱼差异较小; 热风干燥处理的武昌鱼硬度最大 53.96 N、热泵干燥处理的武昌鱼弹性最大; 电子鼻检测表明四种干燥工艺处理武昌鱼风味呈现显著性差异 ( $P < 0.05$ ); 挥发性风味物质检测发现联合干燥处理武昌鱼挥发性风味物质含量最多 21 种, 热泵处理挥发性风味物质含量最低仅有 6 种。综上所述联合干燥处理的武昌鱼鱼肉, 脂质氧化程度硬度低、弹性好、挥发性风味物质含量多种类丰富。

**关键词:** 干燥; 理化指标; 感官评定; 电子鼻; 挥发性风味物质

文章编号: 1673-9078(2023)04-263-270

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.4.0392

## Effects of Different Air-drying Processes on the Quality and Flavor of Wuchang Fish

DENG Yi<sup>1,2</sup>, CHEN Fangxue<sup>1,2</sup>, DU Liu<sup>1,2</sup>, QIAO Yu<sup>2\*</sup>, WU Wenjin<sup>2\*</sup>, LI Dongsheng<sup>1</sup>, LIU Jiping<sup>3</sup>

(1.School of Food and Biological Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

(2.Institute of Agricultural Products Processing and Nuclear-agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agricultural Products Cold Chain Logistics, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430064, China) (3.Hubei Funong Food Industrial Park Co. Ltd., Ezhou 436001, China)

**Abstract:** The effects of different drying processes on the quality characteristics and flavor changes of Wuchang fish were analyzed by measuring the sensory, color, texture, electronic nose, and changes in the volatile flavor components under heat pump, hot air, cold air, and a combination of all four air-drying processes. Lipid oxidation was found to be more significant in fish that were dried using a heat pump, with the primary product, hydroperoxide, reaching 4 mmol/kg and the secondary product, malondialdehyde, reaching 0.68 mg/kg. The best sensory score (8.6 points) and textural performances were obtained in heat pump-dried fish. Cold air drying exhibited the worst performance in terms of color; however, color differences in fish treated with hot air, heat pump, and combined drying were minimal. A hardness of 53.96 N was observed for fish dried using hot air, and the highest elasticity was observed in those treated using a heat pump. The electronic nose test showed significant differences ( $p < 0.05$ ) in the flavor of fish treated by the four drying processes, with 21 volatile flavor compounds obtained from fish under combined drying, and only six under heat pump treatment. In summary, combined drying was found to be the preferred method, with low lipid

引文格式:

邓祎,陈方雪,杜柳,等.不同风干工艺处理的武昌鱼鱼肉品质和风味的变化[J].现代食品科技,2023,39(4):263-270.

DENG Yi, CHEN Fangxue, DU Liu, et al. Effects of different air-drying processes on the quality and flavor of Wuchang fish [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(4): 263-270.

收稿日期: 2022-04-06

基金项目: 湖北省技术创新专项重大项目 (2020BBA048); 湖北省农业科技创新中心重大科技研发项目 (2020-620-000-002-03)

作者简介: 邓祎 (1997-) 男, 硕士研究生, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: 824189788@qq.com

通讯作者: 乔宇 (1981-) 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: qiaoyu412@sina.com; 共同通讯作者: 吴文锦 (1982-) 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 农产品加工与贮藏, E-mail: wuwenjin@hbaas.com

oxidation, low hardness, good elasticity, and rich volatile flavor compounds.

**Key words:** drying; physical and chemical indicator; sensory evaluation; electronic nose; volatile flavor compound

中国是传统的水产品消费大国, 武昌鱼 (*Megalobrama amblycephala*) 因其含肉率高、味道鲜美、有较高的营养价值而深受大众喜爱。市面常见的武昌鱼以生鲜销售为主, 然而生鲜食品食用前复杂的处理和较短的贮藏周期限制了武昌鱼的销量、价格及购置人群。风干工艺是鱼类产品主要的预处理技术之一<sup>[1-3]</sup>, 它在延长水产品的贮藏周期的同时也改善了水产品的适口性、质地和色泽, 在整个腌干过程中还能使鱼肉组织发生化学反应, 生成了醛类、醇类和酮类等挥发性风味化合物, 并对水产品形成新的特征风味发挥着重要作用, 产生腌干鱼特有的风味, 深受大众喜爱<sup>[4]</sup>。因此对武昌鱼进行预处理能有效的提高水产品在售卖过程中的贮藏时间, 同时腌干处理后的武昌鱼会生成独特的腊腌风味, 极大的提高了产品特色, 赋予了产品新的销售卖点, 增加了水产品溢价权。

影响消费者购买风干鱼主要因素为风干鱼的色泽、风味和质地。目前国内对风干武昌鱼的工艺研究主要以如何缩短干制时间, 不同工艺产品的品质贮藏周期的区别等方面, 而对腌干武昌鱼中的感官特性差异研究较少, 陈小雷等<sup>[5]</sup>研究不同干燥工艺对封鳊鱼品质的影响研究发现, 冷风干燥封鳊鱼肉质紧致质构品质最好, 腐败程度较低。冯天依等<sup>[6]</sup>研究表明冷风干燥处理在低温下, 对于微生物腐败微生物腐败起到较好的防止、抑制内源酶活性, 热风干燥处理的鱼肉蛋白的降解和热变性增加, TCA-溶解肽增加了63.10%。罗静等<sup>[7]</sup>研究表明真空冷冻-热泵联合干燥的罗非鱼片的干制品与真空冷冻干燥相比干燥时间缩短, 品质相近。本实验以武昌鱼为研究材料, 同时基于当前水产品的加工产业现状, 采用电子鼻和 GC-MS 等仪器监测不同干燥方式处理的武昌鱼气味和质地变化, 结合感官鉴定, 探讨不同干燥方式(热风干燥、冷风干燥、热泵干燥、联合干燥)对风干武昌鱼的气味、色泽、质地和品质特性的影响, 为水产品的加工干燥技术的应用提供理论支持。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验材料

武昌鱼: 冰鲜, 每条鱼质量约为 400 g; 碘盐, 均购自湖北省武汉市武昌量贩超市; 氯化钠、三氯甲烷、甲醇、三氯乙酸、硫代巴比妥酸、冰醋酸(均为分析纯) 国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 仪器设备

TGL-24MC 台式高速冷冻离心机, 长沙平凡仪器仪表有限公司; PEN3 电子鼻, 德国 Airsense 公司; KQ5200DE 超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司; Ta-XT 2i/50 质构仪, 英国 Stable Micro System 公司; CR-400 色差仪; 5975C 质谱仪(安捷伦科技)的 Agilent 7890A 气相色谱仪

### 1.3 实验方法

#### 1.3.1 样品制备

冰鲜武昌鱼去内脏后洗净, 在  $m=2\%$  盐浓度和  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  环境下恒温腌制 2 d。腌制结束后的武昌鱼清洗表面盐分, 沥水分别置于四种不同烘箱中, 风干至水分含量为 55% 左右结束, 控制在相同水分含量, 热风、热泵、冷风、联合干燥。干燥条件: 热风干燥 ( $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  风干 16 h); 冷风干燥 ( $15\text{ }^{\circ}\text{C}$  风干 48 h); 热泵干燥 ( $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  风干 18 h), 联合干燥 (冷风干燥 12 h 转至热风风干 10 h)。

#### 1.3.2 TBARS 值测定

参考 Salih 等<sup>[8]</sup>的方法并略作改动进行测定, 称取 4.00 g 样品于 50 mL 离心管中, 加 16 mL 水和 20 mL  $\varphi=20\%$  三氯乙酸 (TCA), 在冰水浴中用高速分散机以 10 000 r/min 匀浆 20 s, 静置 1 h, 然后在 3 000 r/min、 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下离心 10 min、过滤, 滤液用超纯水定容到 50 mL, 然后取定容后的滤液 5 mL 于具塞比色管在加入 5 mL 0.02 mol/L 硫代巴比妥酸 (TBA) 在沸水浴中反应 20 min, 取出用水冲洗冷却, 于 532 nm 波长处测定吸光度。

空白组: 取 25 mL  $\varphi=20\%$  TCA 用超纯水定容到 50 mL, 再取 5 mL 滤液加入 5 mL TBA。TBARS 的测定以丙二醛 (MDA) 为标准品, 结果以每千克样品 MDA 的毫克数来表示, 记为 mg MDA/kg。

#### 1.3.3 过氧化值测定

油样制备: 参照 Folch 等<sup>[9]</sup>方法并略作修改。取 3.00 g 样品于离心管加 25 mL 的氯仿-甲醇溶液 (体积比 2:1), 冰水浴匀 40 s 转移到带塞量筒中定容到 50 mL, 在  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  下置放 1 h 过滤除去蛋白、结缔组织, 加入 10 mL 生理盐水, 在  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、5 000 r/min 离心 10 min, 将上层澄清液吸净 (水、甲醇、离子杂质), 将剩余液体转移至离心管, 用氮吹仪氮吹溶剂, 残留物于  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  贮存备用。

称取残留物 0.50 g~1.00 g (精确至 0.001 g), 置于

100 mL 碘量瓶中, 加入 10 mL 三氯甲烷-冰乙酸混合液, 轻轻振摇使油样完全溶解。准确加入 0.50 mL 饱和碘化钾溶液, 塞紧瓶盖, 并轻轻振摇 0.5 min, 避光放置 3 min。取出加 50 mL 水, 摇匀后立即用硫代硫酸钠标准溶液滴定析出的碘, 滴定至淡黄色时, 加 1 mL 淀粉指示剂, 继续滴定并强烈振摇至溶液蓝色消失为终点。同时进行空白试验。

### 1.3.4 感官评价

感官评价实验小组成员, 构成为 6 名无饮食偏见和过敏反应、经验丰富的学生组成 (3 男、3 女, 年龄 20~25 岁)。小组成员根据武昌鱼鱼肉的色泽、气味、质地、对热风干燥组、热泵干燥组、冷风干燥组和联合干燥组武昌鱼进行综合评分。每个指标总分均为 10 分, 分值越大, 特征越强。感官评价总分按加权评分计算。具体评分标准如表 1 所示。

表 1 感官评价标准

Table 1 The sensory evaluation criteria

指标	评分标准	分值
组织形态 (30%)	组织紧密, 肉质硬度适中	8~10
	组织较紧密, 肉质硬度较硬	4~7
	组织疏松, 表面干燥, 内部肉质松软	1~3
色泽 (30%)	表皮有光泽, 肉质亮黄	8~10
	表皮略有光泽, 肉质暗黄	4~7
	表皮暗淡, 肉质棕黄	1~3
气味 (40%)	有风干鱼特有香味	8~10
	香味较浓郁	4~7
	香味一般, 有腥味	1~3

### 1.3.5 色度测定

采用色差仪测定武昌鱼鱼肉的  $L^*$  (亮度值)、 $a^*$  (红度值) 和  $b^*$  (黄度值), 其中  $L^*$  越小越接近黑色,  $L^*$  越大越接近表示白色;  $a^*$  值越大, 越接近红色,  $a^*$  值越小, 越接近绿色;  $b^*$  值越大, 越接近黄色,  $b^*$  值越小越接近蓝色。将鱼样切成 20 mm×20 mm×10 mm 的大小, 测定前用标准白板对色差仪校正每个样品重复测定 3 次。

### 1.3.6 质构特性测定

将武昌鱼鱼肉样放置在质构装载平台上, 使用 P/2N 圆柱探针测定武昌鱼鱼背处鱼肉硬度。模式使用为穿刺, 测试参数为: 测试前探针下压速率 2.00 mm/s、测试探针下压速率 1.00 mm/s、测试结束后探针返回速率 2.00 mm/s、探针下压压缩距离 3.00 mm、触发力 5 g。每个样品做 3 次平行, 结果取平均值。

### 1.3.7 电子鼻分析

准确称取 2.00 g 粉碎后的武昌鱼鱼肉, 置于 50 mL 进样瓶中。顶空平衡条件: 平衡温度 40 °C, 平衡时

间 30 min。电子鼻测定条件: 注射针温度 50 °C, 进气量 150 mL/min, 清洗时间 100 s, 测定时间 180 s, 特征值提取时间点设定为 176~180 s。每个样品做 3 次平行。

### 1.3.8 挥发性成分的测定

准确称取 3.00 g 粉碎后的武昌鱼鱼肉, 置于 20 mL 顶空瓶中, 顶空瓶中含有微型搅拌子, 将顶空瓶置于 50 °C 磁力搅拌水浴锅中平衡 15 min, 然后将型号为 70 μm Carboxen/PDMS 的 SPME 针管插入顶空瓶中顶空吸附 30 min; 待吸附完毕, 取出, 插入 GC-MS 进样口解吸 5 min。在 DB-WAX 色谱柱 (60 m×0.25 mm×0.25 μm, 安捷伦科技公司) 上进行分离。由 GC-MS 分析得到挥发性成分总离子流色谱图, 采用计算机检索参考 NIST 谱库中标准物质的质谱图进行比对, 对样品挥发性成分进行定性分析, 各组分的相对含量采用峰面积归一化法计算。

载气氮气的恒定流速为 1.0 mL/min。进样器温度为 250 °C, 离子源温度为 230 °C。温度程序如下: 烘箱温度保持在 40 °C, 以 2 °C/min 的速度升至 100 °C, 然后以 5 °C/min 的速度升至 180 °C, 最后在 8 °C 升至 250 °C/min, 保持 5 min。涂层纤维在进样口在 250 °C 下解吸 5 min。MS 扫描在 30~400 u 的范围内进行。

## 1.4 数据分析

结果采用 Excel 进行数据处理, DPS 软件进行显著性分析, origin 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同干燥方式对武昌鱼鱼肉 TBA 值、POV 的影响

硫代巴比妥酸值反映的是脂肪氧化的二级产物丙二醛 (MDA) 含量, 是常用来测定肉类脂肪氧化的重要指标之一<sup>[10,11]</sup>, POV 是反应油脂脂肪氧化程度的重要指标之一, 反应油脂氧化的初级产物, 一般样品 POV 越高其脂肪氧化程度也越严重。不同干燥处理后的武昌鱼的硫代巴比妥酸值测定结果如图 1 所示, 四种干燥方式处理后的武昌鱼 TBA 值均未超过 1 mg MDA/kg (图 1), 脂肪氧化程度较低, 能保持较好的品质; 冷风干燥处理的鱼肉在干燥后 TBA 值最低, 为 0.33 mg MDA/kg; 热泵干燥处理的武昌鱼鱼肉 TBA 值最高为 0.68 mg MDA/kg。不同干燥处理后的武昌鱼的 POV 如图 2 所示, 冷风干燥处理的武昌鱼 POV 最低为, 热泵干燥处理的武昌鱼 POV 最高为

4.00 mmol/kg, 整体趋势与 TBA 趋势一致。李宇辉等<sup>[12]</sup>研究表明随着温度升高脂质氧化程度增大, 研究结果与本研究结果趋势相符, 热风、热泵、联合干燥鱼肉检测 TBA 值和 POV 均高于冷风干燥武昌鱼鱼肉。由图 1、图 2 可知热泵干燥处理的武昌鱼鱼肉脂质氧化程度高于热风干燥处理的武昌鱼鱼肉, 高翠竹等<sup>[13]</sup>对南极磷虾肉研究结果趋势相符, 可能是在相同干燥温度下, 干燥时间越长脂肪氧化程度增高。

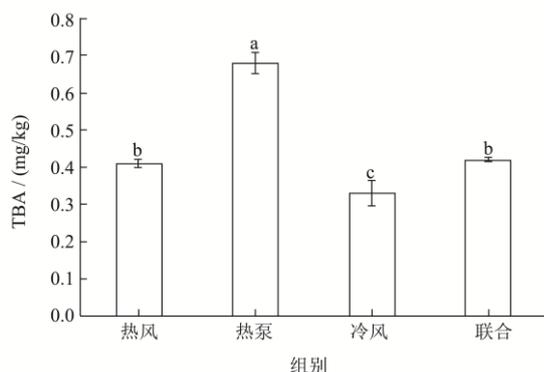


图 1 不同加工工艺腌干武昌鱼 TBARS 值

Fig.1 TBARS of pickled dried Wuchang fish with different processing techniques

注: 不同字母表示存在显著差异 ( $P < 0.05$ ), 下图同。

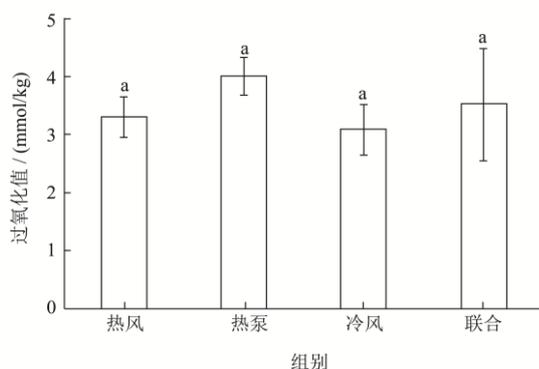


图 2 不同加工工艺腌干武昌鱼 POV

Fig.2 POV of pickled and dried Wuchang fish with different processing techniques

## 2.2 不同干燥方式对武昌鱼鱼肉干燥后质构和色泽的影响

硬度是指样品局部抵抗硬物压入其表面的能力<sup>[14]</sup>。由图 3 所知, 热风干燥处理的武昌鱼鱼肉硬度最大为 54.52 N, 高于其他三种干燥处理的武昌鱼鱼肉, 经过冷风干燥处理下的鱼肉硬度最低为 40.39 N, 与周明珠等<sup>[15]</sup>对不同干燥方式下鲷鱼片研究结果相符, 热风干燥处理的鲷鱼片硬度最大为 1 929.70 g, 这可能是由于武昌鱼鱼肉经过热风干燥后温度过高, 外界湿度较低, 同时鱼肉表面水分的汽化速度过快, 而

内部水分扩散速度慢, 不能及时迁移到鱼肉表面形成断层, 从而使表面迅速形成一层硬壳, 增大了鱼肉表面硬度<sup>[16]</sup>; 弹性是指样品在受到外力作用下发生形变, 撤去外力后恢复原来状态的能力<sup>[17]</sup>, 由图 4 可以看出热泵干燥后的鱼肉弹性最好为 11.56 N, 王倩倩等<sup>[18]</sup>对秋刀鱼研究表明热泵干燥弹性与本研究结果相符。

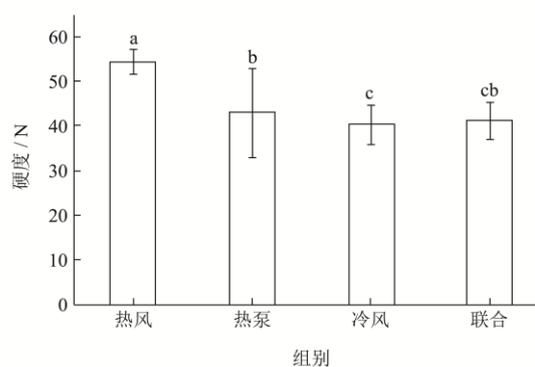


图 3 不同干燥工艺处理武昌鱼硬度值

Fig.3 Hardness values of Wuchang fish treated with different drying processes

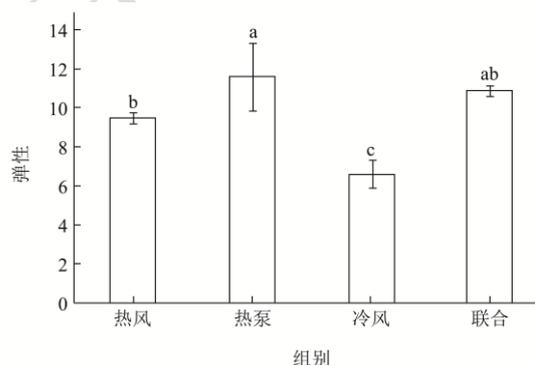


图 4 不同加工工艺腌干武昌鱼弹性值

Fig.4 Elasticity value of pickled dried Wuchang fish with different processing techniques

鱼肉色泽是影响人们消费的重要因素, 是评价武昌鱼品质的重要指标之一, 通常采用  $L^*$ 、 $a^*$ 、 $b^*$  来评价鱼肉色泽变化<sup>[19,20]</sup>。在水产品干制过程中, 脂肪氧化和色素降解都会造成色泽的变化。由图 5 可知, 不同干燥工艺处理下的武昌鱼干燥后  $L^*$  分别为, 43.20、41.19、35.27、42.81,  $a^*$  分别为 6.41、7.99、15.46、16.32,  $b^*$  分别为 13.65、7.99、15.46、16.32。由图 5 可知热风干燥处理的武昌鱼  $L^*$  值最大亮度最高, 可能是由于热风干燥处理的武昌鱼鱼肉表面形成硬壳和油脂氧化后对光线有明显的反射作用<sup>[21]</sup>; 热风干燥处理的武昌鱼鱼肉  $a^*$  最低, 与周亚军等<sup>[22]</sup>对发酵牛肉加工研究趋势相符可能是与热风干燥过程温度最高水分流失最快, 导致加工过程中肌红蛋白的流失变性最大和氧化程度最高; 冷风干燥处理的武昌鱼鱼肉  $b^*$  最低,

研究表明  $b^*$  与肉制品脂质氧化有关, 由冷风干燥脂质氧化程度最低, 因此导致其  $b^*$  最低<sup>[23]</sup>。

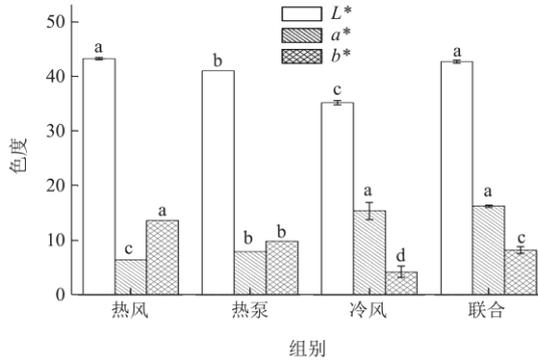


图 5 不同加工工艺腌干武昌鱼色度值

Fig.5 Chromaticity value of pickled dried Wuchang fish with different processing techniques

### 2.3 不同干燥方式对武昌鱼鱼肉干燥后气味和感官的影响

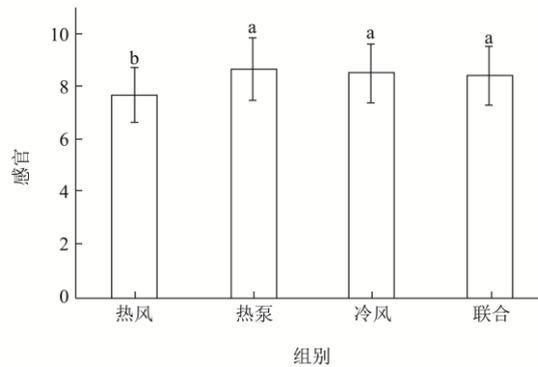


图 6 不同加工工艺腌干武昌鱼感官评分

Fig.6 Sensory scores of pickled and dried Wuchang fish with different processing techniques

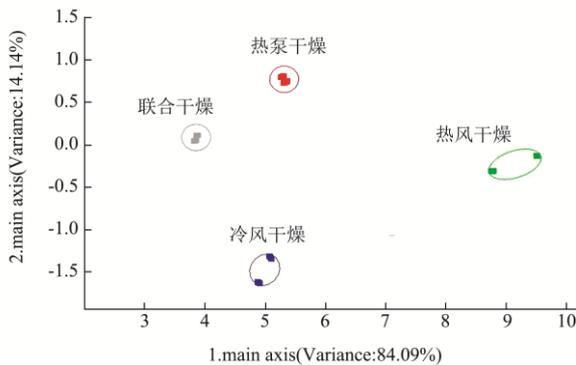


图 7 不同干燥工艺腌干武昌鱼电子鼻主成分分析

Fig.7 Principal component analysis of the electronic nose of Wuchang fish pickled and dried by different drying processes

对四种干燥工艺处理的武昌鱼样品进行感官评定, 评定结果如图 6 所示, 可知热泵干燥、冷风干燥

和联合干燥处理方式的武昌鱼在感官评分上无显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 热风干燥处理的武昌鱼感官评分最低为 7.67, 整体组织紧密, 肉质较硬, 表皮略有光泽, 肉质暗黄, 风干鱼特有香味, 有感官评定可知, 热风干燥处理的武昌鱼肉质最差干燥过程中表面形成硬壳, 联合干燥处理的武昌鱼整体色泽暗淡, 散发热异味。电子鼻是由化学传感器收集成分以及软件系统识别两者组成, 它能从样品的响应信号得到样品的综合评价信息, 可以对不同样品的香气和口感信息进行简单的对比分析<sup>[24]</sup>。四种干燥工艺处理的武昌鱼干燥后主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 结果如图 7 所示, 第一主成分 (PC1) 的贡献率为 84.09%, 第二主成分 (PC2) 的贡献率为 14.14%, 累计贡献率达到 98.23%, 四种干燥工艺处理的武昌鱼气味存在差异。

### 2.4 四种干燥方式对武昌鱼鱼肉干燥后挥发性风味物质的影响

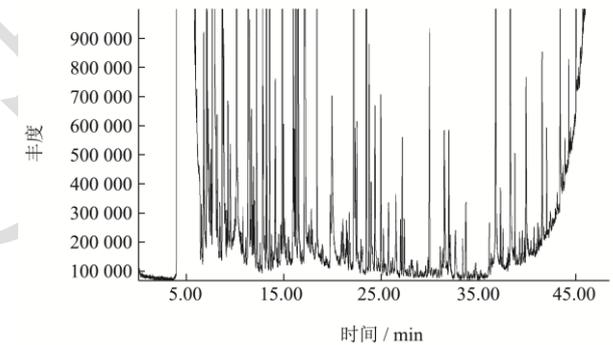


图 8 热风干燥挥发性成分总离子流图

Fig.8 Total ion flow diagram of volatile components of hot air dryin

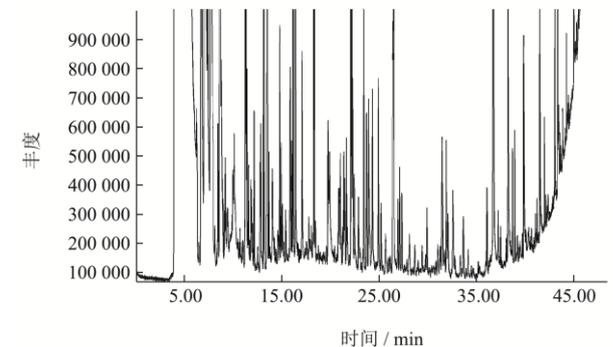


图 9 冷风干燥挥发性成分总离子流图

Fig.9 Total ion flow diagram of volatile components of cold air drying

表 2 不同干燥工艺处理腌干武昌鱼挥发性风味物质组成 (峰面积,  $\times 10^7$ )

Table 2 Composition of volatile flavor compounds in pickled and dried Wuchang fish treated with different drying processes

序列	保留时间/min	名称	联合	冷风	热泵	热风
1	6.81	3-甲基丁醛	7.44	21.7	1.20	1.04
2	9.16	丙醇	1.24			
3	10.15	己醛	26.31	5.74	1.10	1.64
4	12.20	1-戊烯-3-醇	7.13	1.60		
5	12.83	2-庚酮	6.19	1.00		
6	13.21	右旋萜二烯		5.42		1.06
7	13.96	反式-2-己烯醛	5.86			
8	14.13	2-正戊基呋喃	6.10	1.50		
9	14.84	正戊醇	19.60	2.30		
10	15.11	苯乙烯	2.95	0.73		
11	17.17	2,3-辛二酮	83.72	0.79		
12	19.96	壬醛	13.35	3.01		0.56
13	21.54	反式-2-辛烯-1-醇	7.16	0.80		
14	22.22	1-辛烯-3-醇	83.28	24.7	5.10	3.51
15	23.98	2-乙基己醇	3.35	3.17	2.70	1.85
16	25.75	苯甲醛	2.35		1.10	1.13
17	27.17	正辛醇		1.30		
18	32.49	2,3-丁二醇			1.41	0.92

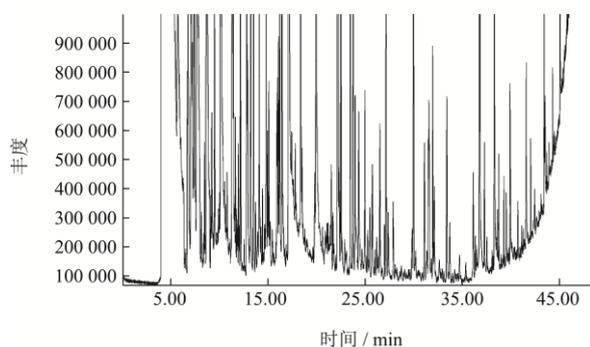


图 10 联合干燥挥发性成分总离子流图

Fig.10 Total ion flow diagram of volatile components of combined drying

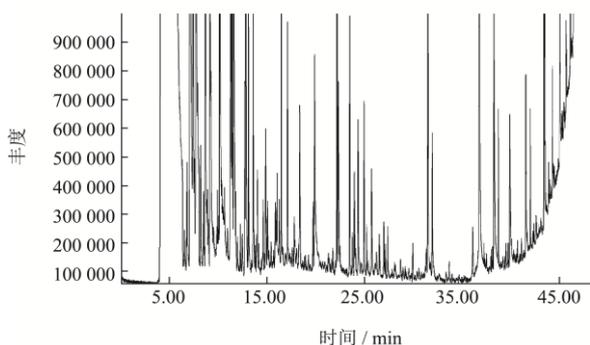


图 11 热泵干燥挥发性成分总离子流图

Fig.11 Total ion flow diagram of volatile components of heat pump drying

由表 2 可知, 四种腌干工艺加工的武昌鱼测得的风味物质种类分别为: 联合干燥样品为 20 种、冷风干燥为 14 种、热泵干燥为 6 种、热风干燥为 8 种, 其中检测出醛类物质 8 种、醇类物质 8 种、酮类物质 2 种、烯炔类物质 2 种和 1 种呋喃类, 其中醛类物质普遍阈值较低, 是武昌鱼风味中主要风味成分<sup>[25]</sup>, 部分酮类、醇类、烯炔类由于阈值较高的原因对风味的影响作用有限<sup>[26]</sup>。联合干燥挥发性风味物质较多可能是由于在前期低温风干下, 内源性脂肪酶系未失活, 分解脂肪生成游离脂肪酸, 同时 LOX 开始作用不饱和脂肪酸生成风味物质, 在干燥后期脂肪水解生成的游离脂肪酸, 在高温下发生自动氧化生成挥发性风味物质<sup>[27]</sup>。腌干武昌鱼中检测到的醛类物质主要有己醛、3-甲基丁醛、苯甲醛、壬醛。己醛来源于花生四烯酸的分解, 它是干腌肉制品的主要氧化产物, 高浓度时呈现出油脂的腐败味, 低浓度具有青草味; 壬醛则由油酸氧化产生, 具有烤焦香味<sup>[28]</sup>; 醇类主要由脂肪氧化得到, 饱和醇类阈值较高对风味贡献较低, 但是不饱和醇类阈值低, 对风味形成贡献较高, 主要呈金属味、蘑菇味, 1-辛烯-3-醇来源于亚油酸氢过氧化物的降解产物, 具有土腥味或蘑菇味<sup>[29]</sup>。由表 3 可知热风干燥和热泵干燥处理的武昌鱼, 1-辛烯-3-醇含量远低于联合干燥处理的武昌鱼和冷风干燥处理的武昌鱼说明高温烘干的武昌鱼可以有效降低成品的鱼腥味, 同时联合干燥

处理的武昌鱼 1-辛烯-3-醇峰面积最大含量最高,因此可能是导致联合干燥处理的武昌鱼感官评分最低得原因<sup>[30]</sup>。腌干武昌鱼中检测到的酮类物质有 2,3-辛二酮和 2-庚酮,酮类化合物是脂肪酸氧化的最终产物,它们一般具有典型的动物油脂味,但由于酮类物质阈值较高,对风味的影响较小,2,3-辛二酮主要来源脂质氧化,阈值较高,呈现酸败味,任志伟等<sup>[31]</sup>研究表明对鸭肉熟制品 WOF 异味抑制研究发现 2,3-辛二酮是呈现热异味(Warmed-Over Flavor)的主要物质之一,主要由不饱和脂肪酸氧化产生,联合干燥处理的武昌鱼中热异味产生的主要原因可能是在冷风干燥时期脂肪酶水解生成的不饱和脂肪酸,在热风干燥时期发生脂质氧化生成的;2-庚酮来源于亚油酸的氧化;烃类物质主要由脂肪酸烷基的裂解产生,阈值较高对风味贡献极低。

### 3 结论

本研究分析比较了热风干燥、热泵干燥、冷风干燥和联合干燥四种干燥方式处理的武昌鱼品质特性、风味特征及风味物质组成。结果表明,热泵干燥处理的武昌鱼 TBA、POV 最高,脂质氧化程度更深,冷风干燥处理的武昌鱼 TBA、POV 最低,脂质氧化程度最低。联合干燥处理的武昌鱼鱼肉硬度较低,弹性最好, $L^*$ 较高。由感官评分可知,四种干燥工艺处理的武昌鱼鱼肉无显著性差异( $P < 0.05$ ),由气质检测可知联合干燥处理的武昌鱼鱼肉挥发性风味物质成分种类最多,含量最丰富。综上所述,联合干燥处理的武昌鱼鱼肉,脂质氧化程度硬度低、弹性好、挥发性风味物质含量多种类丰富。为武昌鱼的腌干加工提供借鉴。

### 参考文献

[1] Zhang J, Cao J, Pei Z, et al. Volatile flavour components and the mechanisms underlying their production in golden pompano (*Trachinotus blochii*) fillets subjected to different drying methods: A comparative study using an electronic nose, an electronic tongue and SDE-GC-MS [J]. Food Research International, 2019, 123(SEP.): 217-225.

[2] Yun Deng, Yali Luo, Yuegang Wang, et al. Effect of different drying methods on the myosin structure, amino acid composition, protein digestibility and volatile profile of squid fillets [J]. Food Chem, 2015, 171: 168-176.

[3] Aksoy A, Karasu S, Akcieck A, et al. Effects of different drying methods on drying kinetics, microstructure, color, and the rehydration ratio of minced meat [J]. Foods, 2019, 8(6):

216.

[4] 吴燕燕,陈茜,石慧,等.不同干燥方式对卵形鲳鲹鱼片风味的影响[J].水产学报,2022,46(7):1188-1200.

[5] 陈小雷,胡王,鲍俊杰,等.不同干燥方式对封鳊鱼品质的影响[J].水产科学,2019,38(1):98-103.

[6] 冯天依,姜启兴,杨方,等.不同干燥方式对鲢鱼肉品质变化的影响[J].食品科技,2019,44(8):120-125.

[7] 罗静,李敏,关志强.干燥工艺对罗非鱼片品质的影响[J].南方农业学报,2020,51(7):1764-1775.

[8] Salih A M, Smith D M, Price J F, et al. Modified extraction 2-thiobarbituric acid method for measuring lipid oxidation in poultry - Science Direct [J]. Poultry Science, 1987, 66(9): 1483-1488.

[9] Folch J. A simple method for the isolation and purification of total lipids from animal tissues [J]. J Biol Chem, 1957, 226.

[10] Weber J, Bochi V C, Ribeiro C P, et al. Effect of different cooking methods on the oxidation, proximate and fatty acid composition of silver catfish (*Rhamdia quelen*) fillets [J]. Food Chemistry, 2008, 106(1): 140-146.

[11] Cheng J H, Ockerman H W. Effect of phosphate with tumbling on lipid oxidation of precooked roast beef - Science Direct [J]. Meat Science, 2003, 65(4): 1353-1359.

[12] 李宇辉,王俊钢,刘成江,等.不同温度处理的风干牛肉贮藏过程中脂肪变化[J].食品科学,2019,40(13):14-21.

[13] 高翠竹,詹宏磊,刘冰南,等.热风干燥加工对南极磷虾肉脂质品质的影响[J].食品工业,2021,42(1):151-156.

[14] 郭培,李川,申铎日,等.金鲳鱼肉和罗非鱼皮明胶改善罗非鱼碎肉鱼糜品质[J].农业工程学报,2016,32(S2):406-411.

[15] 周明珠,熊光权,乔宇,等.不同干燥方式下鲷鱼片的干燥特性及风味变化[J].现代食品科技,2021,37(4):242-251.

[16] D Jain, Pathare P B. Study the drying kinetics of open sun drying of fish [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 78(4): 1315-1319.

[17] Cheng J H, Sun D W, Han Z, et al. Texture and structure measurements and analyses for evaluation of fish and fillet freshness quality: a review [J]. Comprehensive Reviews in Food Science & Food Safety, 2013, 13(1): 52-61.

[18] 王倩倩,吴建中.充氮气热泵干燥对秋刀鱼干燥特性和品质的影响[J].食品工业科技,2021,42(4):12-17,25.

[19] 李双琦,崔震昆.热处理方式对鲈鱼游离氨基酸及品质影响[J].中国调味品,2022,47(1):32-35,45.

[20] 伍勇,刘松青,徐坤,等.发酵蔬菜粉的添加对川味香肠品质的影响[J].中国调味品,2021,46(12):35-41.

[21] Pearson A M, Dutson T R. Scientific Basis for Electrical Stimulation [M]. Advances in Meat Research, 1985: 185-218.

- [22] 周亚军,张玉,陈艳,等.发酵牛肉干加工中理化特性与风味品质分析[J].食品科学,2021,42(14):240-247.
- [23] 李旋,毕金峰,刘璇,等.苹果多酚的组成和功能特性研究现状与展望[J].中国食品学报,2020,20(11):328-340.
- [24] QIN Jiaying, WANG Zhihe, WANG Xichang, et al. Effects of microwave time on quality of grass carp fillets processed through microwave combined with hot-air drying [J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(8): 4159-4171.
- [25] Dashmaa D, Cho B W, Odkhuu G et al. Meat quality and volatile flavor traits of duroc, Berkshire and Yorksire breeds [J]. Korean Journal for Food Science of Animal Resources, 2011, 31(6): 807-816.
- [26] 施文正,陈青云,尤其嘉,等.不同温度条件下草鱼肉挥发性成分的检测[J].食品科学,2014,35(4):66-70.
- [27] Sabrinr, El, Adab, et al. Proteolysis, lipolysis and sensory characteristics of a Tunisian dry fermented poultry meat sausage with oregano and thyme essential oils [J]. Journal of Food Safety, 2016, 36(1): 19-32.
- [28] 周慧敏,张顺亮,郝艳芳,等.HS-SPME-GC-MS-O 结合电子鼻对坨坨猪肉主体风味评价分析[J].食品科学,2021,42(2): 218-226.
- [29] Wang Y, Song H, Zhang Y, et al. Determination of aroma compounds in pork broth produced by different processing methods [J]. Flavour and Fragrance Journal, 2016, 31(4): 319-328.
- [30] 崔方超,李婷婷,杨兵,等.电子鼻结合 GC-MS 分析草鱼脱腥前后风味变化[J].食品科学,2014,35(20):126-130.
- [31] 任志伟,吴巧,陈煌莉,等.葡萄糖添加量和卤制时间对鸭肉熟制品中 WOF(warmed-over flavor)异味调控效果的影响[J].肉类研究,2012,26(1):10-13.