卢桂红, 买尔哈巴·牙生, 库热什·艾买提, 等. 风干博湖草鱼加工工艺优化及风味分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(14): 277−288. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050262
LU Guihong, MAIERHABA Yasheng, KURESHI Aihemaiti, et al. Optimization of Processing Technology and Flavor Analysis of Air-dried Grass Carp in Bosten Lake[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(14): 277−288. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050262

· 分析检测 ·

风干博湖草鱼加工工艺优化及风味分析

卢桂红, 买尔哈巴·牙生, 库热什·艾买提, 毕诗杰, 帕尔哈提·柔孜*, 巴吐尔·阿不力克木
（新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830052）

摘　要: 为提高草鱼深加工利用率和风味品质，本研究以新疆博斯腾湖草鱼为原料，超声辅助真空滚揉进行腌制，通过单因素和模糊数学感官评价结合响应面试验优化腌制工艺条件，采用顶空-固相微萃取-气相色谱-质谱联用（Headspace Solid-Phase Microextraction coupled with Gas Chromatography–Mass Spectrometry，HS-SPME-GC-MS）分析冷风、热风不同风干方式对草鱼块挥发性风味成分的影响。结果表明：超声功率 200 W、真空度 0.06 MPa、超声时间 30 min、盐添加量 1.5%，模糊数学感官评分达 87.6 分，此工艺下得到的风干鱼品质较好。通过 HS-SPME-GC-MS 技术，在冷风与热风风干样品中共检测出 126 种挥发性成分。判别偏最小二乘法（Partial Least Squares Discriminant Analysis，PLS-DA）模型的变量投影重要度（Variable Importance in Projection，VIP）结合热图分析，不同风干方式下鱼肉风味差异显著，VIP>1 时冷风风干含量较高的差异风味化合物鉴定出 8 种，主要包括芳香烃、烷烃、萜烯类，热风风干有 15 种，主要有酯类、酮类、醇类、萜烯类。热风干燥风味物质种类多样，其中酯类和醇类化合物含量显著高于冷风干燥，为草鱼块样品增添了果香、脂肪香，总体风味特征更丰富浓郁。本研究为地方特色风干草鱼腌制工艺优化、风味解析、品质提升及产品升级提供参考。

关键词: 草鱼, 超声辅助真空滚揉, 冷风干燥, 热风干燥, 工艺优化, 挥发性风味物质
中图分类号: TS254.9　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)14−0277−12
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025050262　　本文网刊:

Optimization of Processing Technology and Flavor Analysis of Air-dried Grass Carp in Bosten Lake

LU Guihong, **MAIERHABA Yasheng**, **KURESHI Aihemaiti**, **BI Shijie**, **PARHAT Rozi***, **BATUER Abulikemu**
（College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China）

Abstract: This study utilized Xinjiang Bosten Lake grass carp as the raw material, and the ultrasound-assisted vacuum marination method was employed to enhance the deep processing utilization rate and flavor quality of grass carp. Single-factor experiments and fuzzy mathematics sensory evaluation combined with response surface analysis were used to optimize the marination process conditions. Headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) was employed to analyze the effects of different drying methods, including cold air and hot air, on the volatile flavor components of grass carp blocks. The results showed that the fuzzy mathematics sensory score reached 87.6 with an ultrasound power of 200 W, a vacuum pressure of 0.06 MPa, an ultrasound time of 30 min, and a salt addition of 1.5%, indicating that the dried fish had good quality under these optimal conditions. 126 volatile components were detected in the cold-air-dried and hot-air-dried samples by HS-SPME-GC-MS. The variable importance in the projection (VIP) of the partial least squares-discriminant analysis (PLS-DA) model, combined with heatmap analysis, showed significant differences in fish meat flavor under different drying methods. Eight differential flavor compounds with VIP>1 that exhibited higher levels under cold air drying were identified, mainly including aromatic hydrocarbons, alkanes, and pinenes. In contrast, 15 compounds were identified in the hot air drying method, including esters, ketones, alcohols, and terpenes. There were

收稿日期: 2025−05−28
基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划项目（2023B02037-3-2）。
作者简介: 卢桂红（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: 1662484314@qq.com。
*** 通信作者:** 帕尔哈提·柔孜（1989−）, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品营养与风味, E-mail: parhatruzi@126.com。

various types of flavor compounds in hot air-dried grass carp, among which the content of esters and alcohols was significantly higher than that in the cold air drying method, adding fruity and fatty aromas to grass carp samples, and the overall flavor characteristics are richer and more intense. This study provides a reference for optimizing the drying process, flavor analysis, quality improvement, and product upgrading of local specialty dried grass carp.

Key words: grass carp; ultrasond-assisted vacuum tumbling treatment; cold air drying; hot air drying; process optimization; volatile flavor component

草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)为四大家鱼之首,为我国淡水鱼类重要品种。据 2023 年统计,草鱼的养殖总产量达 594.1 万吨,占全国水产养殖总产量的 10.2%[1],在中国淡水养殖鱼类产量中位于前列。草鱼肉质鲜嫩,富含优质蛋白、多不饱和脂肪酸等营养成分[2],且价格低廉,深受消费者欢迎。草鱼主要以鲜活和粗加工形式销售[3],由于含水量高、品质不稳定、保质期短、深加工利用率低等问题,限制了草鱼产业的高质量发展。

腌制是肉类食品保鲜的传统工艺,可提高产品的保质期、风味、多汁性和嫩度[4]。传统的腌制工艺(如干腌和湿腌)存在腌制时间长、效率低、微生物污染、产品质量不稳定等问题[5],然而,超声、滚揉腌制等技术可提高腌制液吸收、改善肉质地、色泽及嫩度,提高产品品质[6],现已应用于肉类腌制加工中。张桓等[7] 采用超声处理、滚揉处理对盐水鹅进行腌制,发现超声联合滚揉腌制能增强鹅肉保水性,通过蛋白质降解明显提升了鹅肉嫩度。周亚军等[8] 认为超声波/低温真空滚揉复合腌制山黑猪肉,能显著影响山黑猪肉肌原纤维蛋白特性,更好地改善食用品质。目前,超声联合滚揉技术已广泛应用于鸡肉[9]、猪肉[10]、牛肉[11] 等,因此探究一种鱼肉高效快速腌制加工工艺,对推动传统草鱼肉腌制、标准化发展具有重要实践价值。

干制是我国常见的食品保存方式之一,可减少原料中的水分,抑制微生物生长,延长保质期[12]。在风干方式下鱼肉的外表形状、风味物质等会发生变化,近年关于鱼产品干制加工研究已有较多报道。吴永祥等[13] 研究了臭鳜鱼干在不同热风干燥温度(55、65、75、85、95 ℃)下的品质变化,发现 75 ℃ 时,质构特性最好,抗氧化活性最显著,干燥温度过高时,会导致蛋白变性。Yu 等[14] 认为鲢鱼在冷风、热风干燥时,冷风干燥的硬度、咀嚼性较高,热风干燥可大大缩短干燥时间,更易引起蛋白变性,目前鱼肉干制加工大多是含水率、蛋白结构等研究,关联对比不同风干方式下风味影响的研究较少,冷风、热风对草鱼的风味变化研究更是鲜有报道。

新疆博斯腾湖具有独特的冷水性鱼类资源,现发现 32 种鱼类,全年总产量达 7200 吨,已成为全国最大的淡水有机水产品生产示范区[15]。其博湖草鱼肉质紧实、脂肪适中,深受市场欢迎,但存在市售期集中、品质劣变快,加工技术落后、附加值低等问题,因此本研究通过超声辅助真空滚揉技术对博湖草鱼进行腌制,以模糊数学感官评价结合响应面优化法优化腌制工艺,并采用质谱联用技术、PLS-DA 探究冷风、热风不同干制方式下主要风味物质及差异组分,筛选适宜的风干方式,为风干草鱼风味品质控制及工业化生产提供理论参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

草鱼　购于新疆博湖县蓝翔食品水产有限公司;食用盐、胡椒、味精、料酒　购于新疆北园春市场。

CR-040S 超声波清洗机　春霖清洗设备有限公司;BVRJ-150 真空滚揉机　嘉兴艾博实业股份有限公司;可调冷风风干箱　新疆农业大学食品科学与药学学院肉品研究组自主研发(专利号:ZL202121292316.4);101-E 热风干燥箱　北京市永光明医疗仪器有限公司;启天 M6900TAXT 质构仪　联想(北京)有限公司;TGL-16M 高速冷冻离心机　湖南湘鑫仪器仪表有限公司;8890-5977B 气相色谱-质谱联用仪　美国 Agilent 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 风干博湖草鱼加工工艺　工艺流程:冷冻草鱼→解冻→去内脏→清洗→切块→沥干→腌制→超声辅助真空滚揉→风干→成品。

操作要点:草鱼流水解冻 30 min,去除内脏、血水,沥干表面水分,将鱼肉切成 2 cm×2 cm×1 cm 大小的肉块,以鱼肉质量计,食盐 1.5%、胡椒 0.15%、味精 0.4%、料酒 3% 按比例混合均匀涂抹在鱼肉上进行超声,再放入真空滚揉机滚揉腌制 20 min 后分别进行冷风、热风风干。冷风风干条件为风速 3 m/s、相对湿度 55%~70%、温度 12 ℃、时间 8 d;热风风干温度为 80 ℃、时间 8 h。

1.2.2 单因素实验　固定各因素参数超声功率 200 W、真空滚揉度 0.06 MPa、超声时间 30 min,食盐添加量 1.5%。研究超声功率(160、180、200、220、240 W)、真空滚揉度(0、0.02、0.04、0.06、0.08 MPa)、食盐添加量(1%、1.5%、2%、2.5%、3%)、超声时间(10、20、30、40、50 min)对风干鱼肉感官评分、质构、腌制吸收率及离心损失率的影响。

1.2.3 响应面试验　在单因素实验基础上,以模糊数学感官评分为响应值,选取超声功率、真空滚揉度、超声时间、盐添加量四个变量,利用 Design-Expert 8.0.6 软件设计四因素三水平响应面优化试验。响应面因素编码及水平见表 1。

1.2.4 模糊数学评价模型建立　选 10 名(男女比例

表 1　响应面试验因素水平设计

Table 1　Factor level design of response surface test

水平	因素			
	A超声功率（W）	B真空滚揉度（MPa）	C超声时间（min）	D食盐添加量（%）
−1	180	0.04	20	1
0	200	0.06	30	1.5
1	220	0.08	40	2

表 2　风干鱼感官评定标准

Table 2　Sensory evaluation criteria for air-dried fish

评语	质地	色泽	香气	组织状态
优	肉质嚼劲和弹性好	色泽光亮，颜色均匀	香气浓郁、无腥味	形状规整、肉质紧实
良	肉质嚼劲和弹性一般	色泽光亮，颜色较好	香气较浓郁、略有腥味	形状较规整、肉质较紧实
中	肉质嚼劲和弹性较差	色泽暗淡，颜色呈灰白色	香气较淡、有腥味	形状不规整、肉质较软
差	肉质无嚼劲和弹性	颜色灰黯不均，有深灰色	无香气、腥味重	形状不规整、肉质松软

1∶1)经过培训的相关专业人员进行感官评定，四个评价指标每项满分为 100 分，后经过权重计算并求和后得到感官评价总分，具体评分标准见表 2。

建立评价因素集 $L=\{l_1, l_2, l_3, l_4\}$={质地，色泽，香气，组织状态}，采用强制决定法确定风干鱼各项目的权重，权重 $V=\{v_1, v_2, v_3, v_4\}=\{0.4, 0.2, 0.2, 0.2\}$，评语集 $W=\{w_1, w_2, w_3, w_4\}$={优，良，中，差}，分数等级集 $B=\{b_1, b_2, b_3, b_4\}=\{100, 80, 60, 40\}$，模糊数学综合评价向量 $X_i=L\cdot Y_i$，其中 Y_i 为模糊评价矩阵，i=1, 2, 3.....29，模糊数学感官评价总分 $Z_i=X_i\cdot B$。

1.2.5　风干鱼指标的测定

1.2.5.1　质构测定　选用 TPA 模式测定鱼肉样品，探头选择 P/0.5S，参数设定：测前、测中速度为 1.00 mm/s，测后速度 2.00 mm/s，形变量为 40%，测试时间为 5.00 s，触发力为 5 g。

1.2.5.2　腌制吸收率　腌制结束后，将鱼块静置沥水 5 min，腌制吸收率按式(1)进行计算。

$$腌制吸收率(\%)=\frac{m_2-m_1}{m_1}\times 100 \qquad 式（1）$$

式中：m_1 为草鱼块腌制前的质量；m_2 为腌制后的质量

1.2.5.3　离心损失率　参考鲍佳丽[16] 的方法，取腌制草鱼块 2 g，吸干表面水分后，用滤纸包裹，置于底部垫有脱脂棉的 50 mL 离心管中。以 8000 r/min、10 ℃ 离心 10 min，测定离心前后质量，按式(2)计算离心损失率。

$$离心损失率(\%)=\frac{m_3-m_4}{m_3}\times 100 \qquad 式（2）$$

式中：m_3 为离心前草鱼块质量；m_4 为离心后质量。

1.2.5.4　挥发性风味化合物的测定　参考 Nie 等[17] 方法，稍作修改。取 2.3 g 粉碎的鱼肉置于 20 mL 顶空瓶中，内标 2,4,6-三甲基-吡啶 10 μL(0.6534 mg/mL)，密封后 60 ℃ 水浴平衡 20 min，选用 65 μm 的 PDMS/DVB 萃取头，吸附 45 min 后，立即拔出，GC-MS 进样分析。

气相色谱参数：HP-5MS 石英毛细管柱(30 m×250 μm×0.25 μm)，进样口温度 240 ℃，进样方式为不分流，载气 He，柱流量 1 mL/min，升温程序：40 ℃ 保持 4 min，以 3 ℃/min 升温至 160 ℃ 后，再以 5 ℃/min 升至 270 ℃ 保持 5 min。

质谱条件：离子源温度为 230 ℃，四极杆温度为 150 ℃，电子能量 70 eV，辅助加热 270 ℃，扫描范围 35~550 Da。

定性与定量分析：化合物采用 NIST 20 检索，选择匹配值相似度大于 80% 的物质定性分析，确定样品化学组成。计算每种挥发性化合物的峰面积和内标物的峰面积比值，对鱼肉中各挥发物进行定量分析，定量计算公式见式(3)。

$$C_i=\frac{C_0\times V_0\times A_i}{A_0\times m_1} \qquad 式（3）$$

式中：C_i 为待测样品中各风味物质质量浓度，μg/g；m_1 为样品质量浓度，g；C_0 为内标物质量浓度，μg/mL；V_0 内标物体积，μL；A_i 为待测样品中各风味物质的峰面积；A_0 为内标物峰面积。

1.3　数据处理

所有实验均重复三次，实验数据以平均值±标准差表示。使用 SPSS 27.0 进行方差分析和 Duncan 多重比较(P<0.05)。使用 Design-Expert V8.0.6.1 软件进行响应面优化实验设计。通过 SIMCA 14.1 软件进行 PLS-DA 分析。

2　结果与分析

2.1　单因素实验结果

2.1.1　超声功率对风干鱼品质的影响　由图 1A 可知，当超声功率为 160~200 W 时，感官评分显著上升(P<0.05)，可能是超声功率处理增强了肌原纤维蛋白的溶解度，有利于风味的渗透，从而在咀嚼过程中表现出更佳的口感。超声功率增至 200~240 W 时，感官评分显著降低(P<0.05)，说明适宜的超声功率可提高肉的风味。如图 1B 所示，随超声功率的增大，风干鱼肉的硬度、弹性均呈下降趋势，导致下降原因可能是超声功率导致肉的局部升温，引发部分蛋白热变性，削弱了结构强度，这与刘佳利等[18] 研究结果相似，其发现超声处理牛肉，咀嚼性提高，硬度降低，加速了食盐渗透，从而使肉的保水性和质地提高。图 1C 可知，腌制吸收率随超声功率先显著上升，后降低，超声功率 180 W 时达最高，由于超声功率的提高，空化效应等物理作用增强，对鱼肉组织的破坏程度加剧，从而降低了化学物质渗透的阻力[19]。离心损失率在 160~200 W 下降，200 W 时最低，变化显著

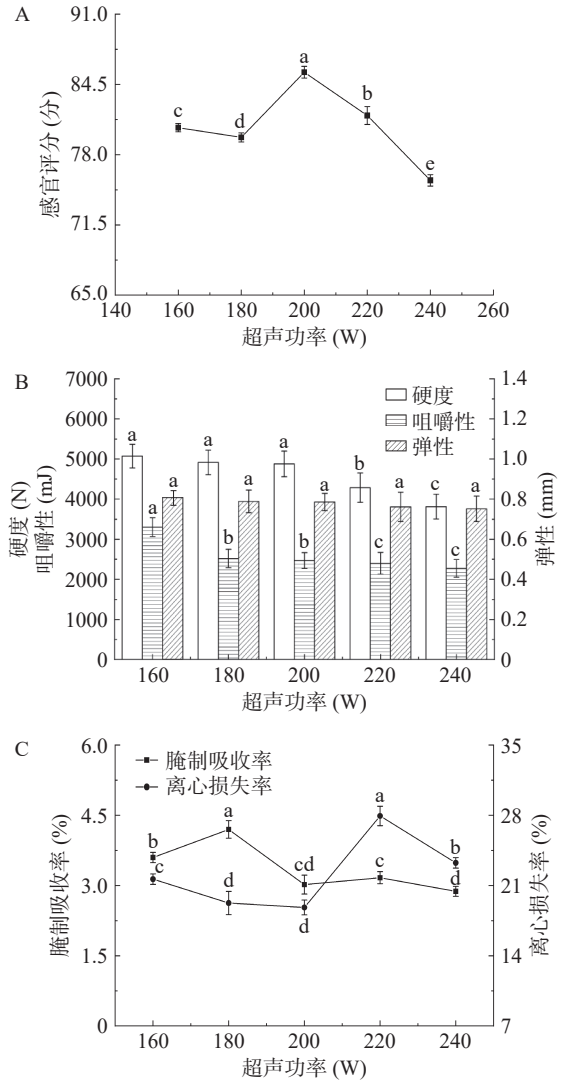


图 1 超声功率对风干鱼感官评分(A)、质构(B)、腌制吸收率、离心损失率(C)的影响

Fig.1 Effects of ultrasonic power on sensory score (A), texture (B), marinade absorption rate and centrifugal loss rate (C) of air-dried fish

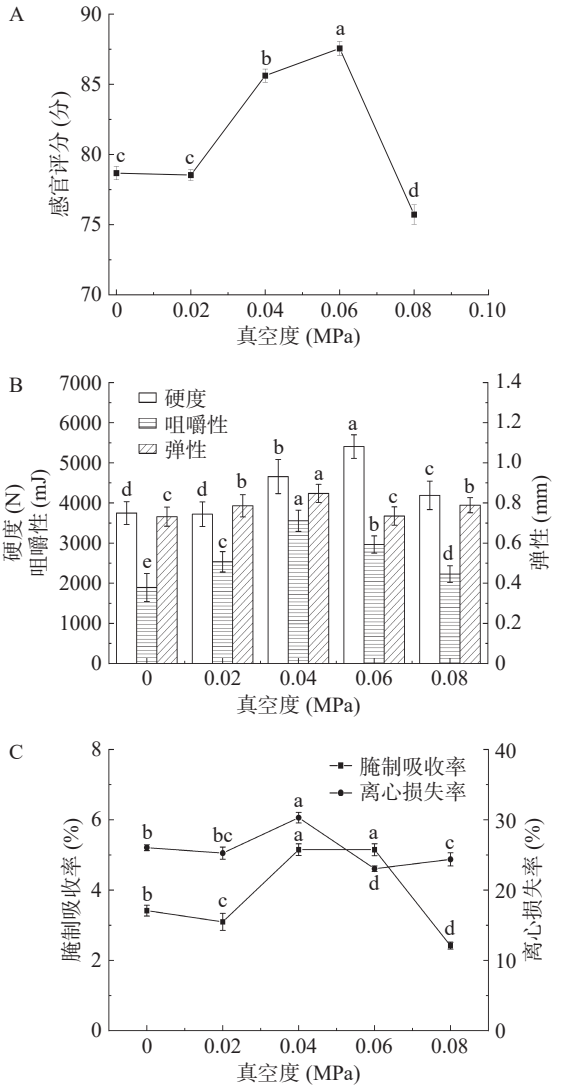


图 2 真空度对风干鱼感官评分(A)、质构(B)、腌制吸收率、离心损失率(C)的影响

Fig.2 Effects of vacuum degree on sensory score (A), texture (B), marinade absorption rate and centrifugal loss rate (C) of air-dried fish

注: 不同小写字母表示差异显著 $P<0.05$, 图 2~图 5 同。

($P<0.05$), 由于肌肉组织间隙中的自由水流失加剧[20], 导致离心损失率显著上升, 因此考虑鱼肉品质和腌制效果, 选择 200 W 的超声功率为宜。

2.1.2 真空度对风干鱼品质的影响 由图 2A 可知, 真空度为 0~0.06 MPa 时, 感官评分显著上升($P<0.05$), 可能是真空度的变化使鱼肉表面内外压差较大, 肌纤维结构舒展, 促使腌制液渗透到肌肉组织内部, 在肉中的分布更加均匀, 提高了风干鱼制品口感[21]。由图 2B 可知, 随真空度的提高, 风干鱼肉硬度逐渐增加, 真空度 0.06 MPa 时最高, 弹性、咀嚼性先升高后下降, 变化显著($P<0.05$), 0.04 MPa 时达最大值, 可能是真空环境下加速了食盐渗透, 溶解肌原纤维蛋白, 形成黏性溶液, 这些蛋白在热处理后形成致密的三维凝胶网络, 改善了风干鱼质构品质[22]。如图 2C 所示, 真空度 0~0.08 MPa 内腌制吸收率呈先升高后下降的趋势, 0.06 MPa 时达最高, 为 5.15%, 差异显著($P<0.05$), 离心损失率在 0.06 MPa 时达最低, 为 23.03%, 由于真空度的变化使鱼肉表面内外压差较大, 肌纤维结构舒展, 有利于腌制液渗透到肌肉组织内部, 使保水性增强, 但真空度超出适宜范围时会造成肌原纤维结构被破坏[23], 因此选择真空度 0.06 MPa 为宜。

2.1.3 食盐添加量对风干鱼品质的影响 如图 3A 所示, 感官评分呈上升趋势, 在 1.5% 时达最高值, 咸香适宜, 1.5%~3.0% 时, 感官评分显著下降($P<0.05$), 可能是低盐离子浓度下促进了鱼肉中游离氨基酸和游离脂肪酸的积累, 从而加强了香气化合物的形成[24], 当盐离子浓度过高时, 会降低挥发性风味的扩散速度, 影响分子基团间的互作, 使口感减弱[25]。如图 3B 所示, 随盐添加量增加, 硬度和咀嚼性先升高后下降, 可能是食盐进入鱼肉的肌肉组织, 使草鱼肉的盐溶性蛋白溶解, 破坏了肌肉组织, 导致硬度、咀嚼性下降[26]。盐添加量为 1.0%~2.5% 时, 鱼肉弹性略微

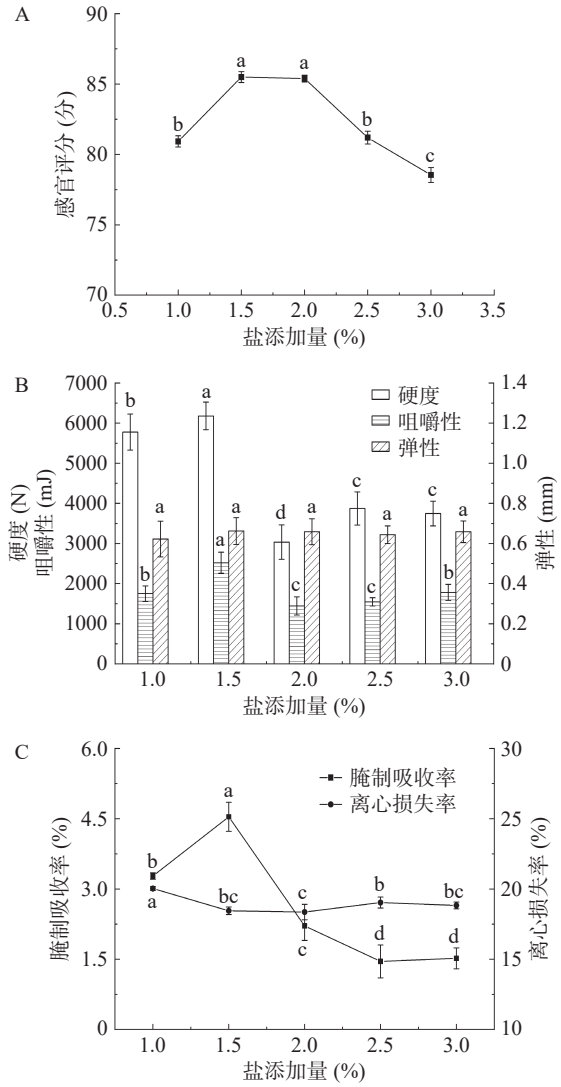


图 3　盐添加量对风干鱼感官评分(A)、质构(B)、腌制吸收率、离心损失率(C)的影响

Fig.3　Effects of salt addition on sensory score (A), texture (B), marinade absorption rate and centrifugal loss rate (C) of air-dried fish

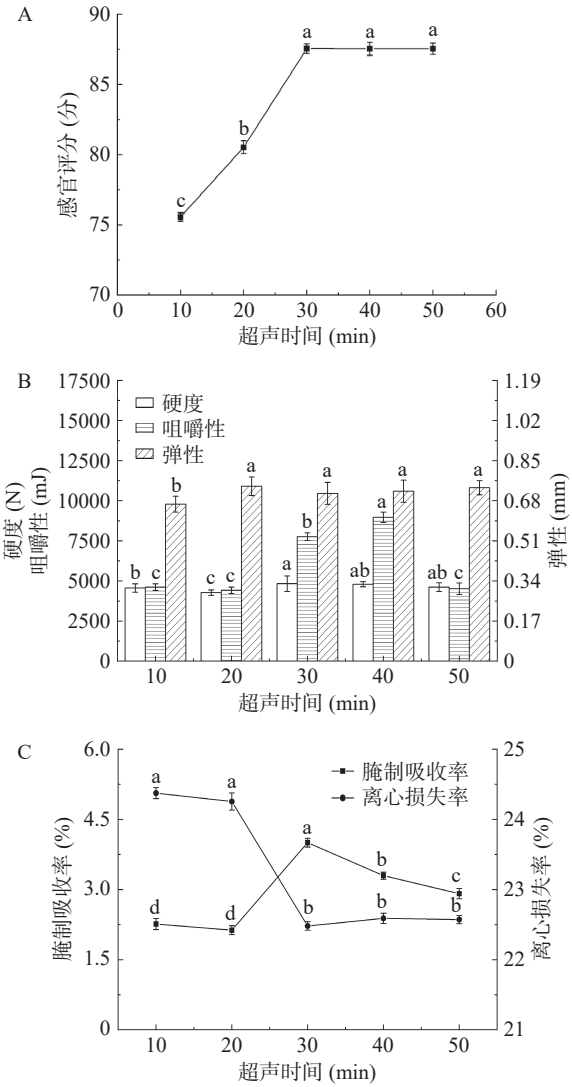


图 4　超声时间对风干鱼感官评分(A)、质构(B)、腌制吸收率、离心损失率(C)的影响

Fig.4　Effects of ultrasound time on sensory score (A), texture (B), marinade absorption rate and centrifugal loss rate (C) of air-dried fish

增加，但无显著性差异，由于盐溶性蛋白的溶解形成了溶胶，使弹性增大。如图 3C 所示，在盐添加量为 1.5% 时腌制吸收率达最高，为 4.54%，变化差异显著(P<0.05)，由于盐溶解肌原纤维蛋白，增强了结合水的能力，提高了腌制吸收率。这与高山[27] 研究变化趋势一致，其在腊肉腌制加工中也观察到腌制吸收率随盐添加量先升高后降低。盐添加量在 1.0%~2.0% 时，离心损失率呈下降趋势，可能是 Na^+与蛋白质电荷中和，减少静电斥力，增强水合作用，2.5%~3.0% 时，离心损失率基本达平衡状态[28]，综合考虑鱼肉的感官评分、质构、腌制吸收率、离心损失率，选择盐添加量为 1.5%。

2.1.4　超声时间对风干鱼品质的影响　由图 4A 可知，超声时间为 10~30 min 时，感官评分呈上升趋势，在 30 min 时达最高值，超声处理破坏了肌肉纤维，溶出了更多的滋味物质，赋予鱼肉较好的口感和风味。如图 4B 所示，随超声腌制时间的增加，硬度、咀嚼性、弹性先上升后下降，超声时间过长会使持水性下降和肌纤维结构破坏，造成质构特性降低，与李心悦等[29] 研究结果相似，超声短时间处理能够改善肉质品质特性。如图 4C 所示，随超声时间增加，腌制吸收率先升高后降低，在超声 30 min 时最高为 4.1%，差异显著(P<0.05)。10~30 min 时离心损失率显著下降(P<0.05)，之后缓慢升高，可能是随时间延长，超声波的机械振动作用加剧了肌肉纤维结构损伤，使细胞内水分更易流失[30]，因此综合考虑超声最佳时间为 30 min。

2.2　模糊数学感官评价结果

选择 10 位嗅觉灵敏的食品培训人员对 29 组样品的质地、色泽、香气、组织状态进行感官评定，对各因素在优、良、中、差等级中的分布人数进行统计，统计结果见表 3。

由统计结果可知，10 位培训人员中有 5 位认为样品 1 的质地为优，2 位认为质地良，3 位认为质地

表 3 模糊数学感官评价结果

Table 3 Sensory evaluation results of fuzzy mathematics

实验号	质地				色泽				香气				组织状态			
	m_1	m_2	m_3	m_4	m_1	m_2	m_3	m_4	m_1	m_2	m_3	m_4	m_1	m_2	m_3	m_4
1	5	2	3	0	4	2	3	1	4	2	3	1	5	5	0	0
2	4	1	3	2	4	2	3	1	4	3	3	0	5	5	0	0
3	4	1	3	2	4	3	2	1	5	2	3	0	5	4	1	0
4	5	1	3	1	5	1	2	2	4	3	3	0	4	3	2	1
5	6	2	1	1	5	2	1	2	5	3	1	1	4	2	3	1
6	5	2	1	2	5	3	2	0	5	5	0	0	6	3	1	0
7	5	2	3	0	4	2	4	0	4	3	3	0	4	4	2	0
8	4	2	2	2	5	1	2	2	6	4	0	0	5	5	0	0
9	6	2	2	0	6	3	0	1	6	3	1	0	4	2	2	2
10	4	3	2	1	4	3	2	1	5	2	3	0	6	2	2	0
11	5	1	2	2	5	3	1	1	6	3	1	0	5	4	1	0
12	5	3	2	0	4	1	3	2	5	3	1	1	5	3	1	1
13	6	1	3	0	4	1	3	2	4	2	3	1	4	3	3	0
14	5	2	2	1	5	2	3	0	4	3	2	1	4	2	3	1
15	5	3	1	1	6	1	2	1	5	1	3	1	5	2	2	1
16	5	3	1	1	6	1	2	1	5	1	3	1	4	2	1	3
17	5	3	1	1	6	1	2	1	5	1	2	2	4	2	2	2
18	5	1	1	3	4	2	2	2	5	1	2	2	6	2	2	0
19	6	1	1	2	4	2	2	2	4	2	3	1	5	2	2	1
20	4	2	2	2	4	2	2	2	5	2	2	1	6	2	2	0
21	6	2	1	1	5	2	1	2	6	4	0	0	4	3	3	0
22	4	2	2	2	5	2	3	0	5	3	2	0	6	3	1	0
23	5	3	2	0	5	2	2	1	5	2	1	2	4	1	2	3
24	5	1	2	2	5	1	2	2	5	3	2	0	6	2	1	1
25	6	2	1	1	5	3	1	1	6	4	0	0	5	4	1	0
26	6	3	1	0	6	4	0	0	5	3	1	1	4	3	1	2
27	6	3	1	0	6	2	2	0	6	4	0	0	5	1	2	2
28	5	3	2	0	6	1	2	1	6	4	0	0	5	5	0	0
29	6	4	0	0	6	3	1	0	5	3	2	0	5	1	2	2

中，所以 $l_{质地}$={0.5, 0.2, 0.3, 0}，$l_{色泽}$={0.4, 0.2, 0.3, 0.1}，$l_{香气}$={0.4, 0.2, 0.3, 0.1}，$l_{组织状态}$={0.5, 0.5, 0, 0}，建立模糊评价矩阵 Y_1：

$$Y_1=\begin{vmatrix}0.5 & 0.2 & 0.3 & 0\\ 0.4 & 0.2 & 0.3 & 0.1\\ 0.4 & 0.2 & 0.3 & 0.1\\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0\end{vmatrix}$$

按照矩阵计算 $X_i=V\cdot Y_i$，对风干鱼进行综合判断，评定结果为：

$$X_1=\{0.4,0.2,0.2,0.2\}\cdot\begin{vmatrix}0.5 & 0.2 & 0.3 & 0\\ 0.4 & 0.2 & 0.3 & 0.1\\ 0.4 & 0.2 & 0.3 & 0.1\\ 0.5 & 0.5 & 0 & 0\end{vmatrix}$$

$$X_1=\{0.46,0.26,0.24,0.04\}$$

同理可得 X_2~X_{29}，模糊数学感官评分计算公式 $Z_i=X_i\cdot B$，则第一组样品感官评分结果为 Z_1=0.46×100+0.26×80+0.24×60+0.04×40=82.8，同理得 Z_2~Z_{29}。

2.3 响应面法优化试验结果分析

2.3.1 拟合模型的建立与分析 以单因素实验为基础，超声功率、真空度、超声时间、盐添加量为试验因素，模糊数学感官评分为响应值，得风干鱼响应面试验结果如表 4，得到二次多项回归方程：

根据响应面优化试验设计结果表 5，得到模糊数学感官评分的回归方程：

$$Y=87.36-0.80A-0.57B+0.27C-1.03D+0.80AB+0.50AC+0.90AD-0.40BC+0.70BD-0.70CD-4.51A^2-2.76B^2-2.71C^2-1.86D^2$$。

由回归方程方差分析表 5 可知，实验模型 $P<0.0001$，达极显著，失拟项 $P>0.05$，不显著，表明此模型可靠，同时 R^2=0.9744，R^2_{Adj}=0.9488 与 R^2 接近，变异系数较小(C.V.%=0.76)，表明模型拟合程度较高。表 5 中的 A、B、D、AB、AD、BD、CD、A^2、B^2、C^2、D^2 的 P 值<0.05，均达显著水平，由 F 值可判断，各因素对模糊数学感官评价的影响顺序为 D>A>B>C。

2.3.2 验证实验 模型预测风干鱼最佳腌制工艺为：超声功率 197.66 W，真空度 0.06 MPa，超声时间 30.66 min、盐添加量 1.26%，模糊数学感官评分为 87.6304 分，基于实际条件，将参数调整为超声功率 200 W、真空度 0.06 MPa、超声时间 30 min、盐添加量 1.5%，采用此工艺参数制作风干鱼，其模糊数学感官评分为 87.6 分，与预测值相近。

2.4 风干鱼风味品质分析

2.4.1 风干鱼 GC-MS 分析 GC-MS 测定冷风、热风两种加工方式之间风味成分和气味差异，结合图 5

表 4　Box-Behnken 试验设计与结果

Table 4　Box-Behnken design and results

实验号	A超声功率（W）	B真空度（MPa）	C超声时间（min）	D盐添加量（%）	模糊数学感官评分(分)
1	180	0.04	30	1.5	82.8
2	220	0.04	30	1.5	79.6
3	180	0.08	30	1.5	80.0
4	220	0.08	30	1.5	80.0
5	200	0.06	20	1	82.8
6	200	0.06	40	1	85.2
7	200	0.06	20	2	82.8
8	200	0.06	40	2	82.4
9	180	0.06	30	1	83.6
10	220	0.06	30	1	80.0
11	180	0.06	30	2	79.6
12	220	0.06	30	2	79.6
13	200	0.04	20	1.5	81.2
14	200	0.08	20	1.5	81.2
15	200	0.04	40	1.5	82.8
16	200	0.08	40	1.5	81.2
17	180	0.06	20	1.5	81.2
18	220	0.06	20	1.5	78.8
19	180	0.06	40	1.5	80.0
20	220	0.06	40	1.5	79.6
21	200	0.04	30	1	85.2
22	200	0.08	30	1	82.4
23	200	0.04	30	2	81.2
24	200	0.08	30	2	81.2
25	200	0.06	30	1.5	87.2
26	200	0.06	30	1.5	86.8
27	200	0.06	30	1.5	87.6
28	200	0.06	30	1.5	87.6
29	200	0.06	30	1.5	87.6

表 5　回归方程方差分析结果

Table 5　Analysis of variance results for the regression equation

差异来源	平方和	自由度	均方	F值	P值
模型	211.63	14	15.12	38.03	<0.0001**
A	7.68	1	7.68	19.32	0.0006**
B	3.85	1	3.85	9.69	0.0076**
C	0.85	1	0.85	2.15	0.1650
D	12.81	1	12.81	32.23	<0.0001**
AB	2.56	1	2.56	6.44	0.0237*
AC	1	1	1.00	2.52	0.1350
AD	3.24	1	3.24	8.15	0.0127*
BC	0.64	1	0.64	1.61	0.2252
BD	1.96	1	1.96	4.93	0.0434*
CD	1.96	1	1.96	4.93	0.0434*
A^2	132.13	1	132.13	332.38	<0.0001**
B^2	49.53	1	49.53	124.60	<0.0001**
C^2	47.75	1	47.75	120.13	<0.0001**
D^2	22.52	1	22.52	56.65	<0.0001**
残差	5.57	14	0.40		
失拟项	5.05	10	0.51	3.95	0.0989
误差	0.51	4	0.13		
总和	217.19	28			

R^2=0.9744　R^2_{Adj}=0.9488　R^2_{Pre}=0.8623　C.V.%=0.76

注：*为差异显著（P<0.05）；**为差异极显著（P<0.01）。

和表 6 可知，共检测到 126 种风味化合物，包含酮类 10 种，醇类 11 种，醛类 15 种，酯类 27 种，芳香烃 8 种，烷烃类 23 种，萜烯类 23 种，吡啶类 1 种，其他 8 种。其中酮类、醇类含量较高，可作为草鱼干香气的主要组成部分。

酮通常是由不饱和脂肪酸氧化降解形成[31]，但其阈值较高，对鱼肉香气贡献程度较低。丙酮含量丰富，具有果香味，在干腌香肠中，丙酮也是主要的酮类化合物之一[32]。醇类物质形成主要包括羰基化合物

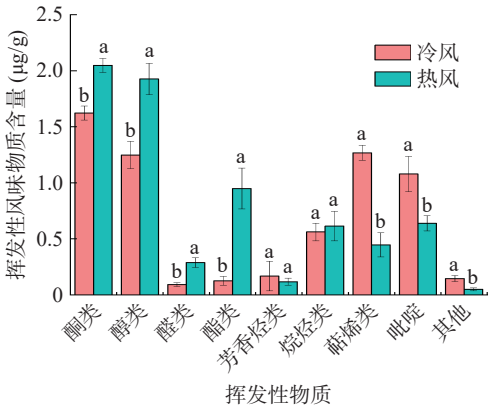


图 5　不同风干方式风干鱼中挥发性风味物质含量

Fig.5　Content of volatile flavor compounds in air-dried fish by different air-drying methods

注：不同字母表示显著性差异，P<0.05。

表 6　不同风干方式挥发性成分 GC-MS 分析结果

Table 6　GC-MS analysis results of volatile components by different air-drying methods

分类	化合物	分子量(Da)	RI	含量(μg/g)		气味特征描述
				冷风	热风	
酮类				1.62[b]	2.05[a]	
	丙酮	58.042	487	1.49[a]	1.84[b]	果香
	2-庚酮	114.104	895	0.01[a]	0.01[a]	香蕉、奶酪香气
	6-甲基-5-庚烯-2-酮	126.104	993	0.06[a]	0.08[a]	青草香
	苯乙酮	120.058	1068	0.02	–	甜杏仁香
	庚烷-2-酮	152.120	1146	0.02	–	松木香
	乙偶姻	88.052	713	0.02[a]	0.04[a]	奶油焦糖香、黄油味
	1-羟基-2-丙酮	74.037	666	–	0.01	焦糖、麦芽香
	3-甲基-2-己酮	114.104	807	–	0.01	苹果香
	2-甲基-3-辛酮	142.136	987	–	0.02	泥土香
	2-十一酮	170.167	1296	–	0.04	奶酪、油脂味

续表 6

分类	化合物	分子量(Da)	RI	含量(μg/g)		气味特征描述
				冷风	热风	
醇类				1.25[b]	1.93[a]	
	甲醇	32.026	354	0.49[a]	0.63[b]	酒精味
	乙醇	46.042	427	0.46[a]	0.85[b]	酒精味
	1-辛烯-3-醇	128.120	997	0.02	–	蘑菇香
	桉叶醇	154.136	1033	0.15[a]	0.16[a]	樟脑样气味
	α,*α*-二甲基-苯甲醇	136.089	1089	0.01	–	花香
	L-*α*-松油醇	154.136	1193	0.09[a]	0.10[a]	松木香、略带柑橘或花香
	3,7,11-三甲基-1-十二烷醇	228.245	1348	0.01	–	蜡质气味、油脂味
	1-甲氧基-2-丙醇	90.068	661	–	0.01	微弱甜味、酒精味
	4-松油醇	154.136	1178	0.02[a]	0.02[a]	草本、泥土香
	芳樟醇	154.136	1103	–	0.08	清新花香、木质香
	香叶醇	154.136	1291	–	0.08	玫瑰花香
醛类				0.09[b]	0.29[a]	
	3-甲基丁醛	86.073	652	0.01[a]	0.03[a]	麦芽香、巧克力味
	苯甲醛	106.042	960	0.01[a]	0.01[a]	杏仁香
	壬醛	170.167	1106	0.02[a]	0.05[a]	脂肪香、柑橘香
	4-乙基苯甲醛	134.073	1163	0.01[a]	0.02[a]	杏仁香
	橙花醛	152.120	1245	0.01[a]	0.01[a]	柑橘味
	柠檬醛	152.120	1275	0.02[a]	0.02[a]	柠檬香
	十六醛	240.245	1815	0.01[a]	0.01[a]	蜡质味
	2-甲基丁醛	86.073	662	–	0.01	青草香
	戊醛	86.073	700	–	0.01	杏仁香、麦芽香
	2-甲基-2-丁烯醛	84.058	727	–	0.01	焦糖香
	己醛	100.089	794	–	0.04	苹果香、青草香
	庚醛	114.104	903	–	0.01	脂肪香、奶酪味、鱼腥味
	甲硫基丙醛	104.030	908	–	0.01	蒜香
	苯乙醛	120.058	1044	–	0.02	风信子香、甜杏仁香
	癸醛	156.151	1207	–	0.03	柑橘香、蜡质香
酯类				0.13[b]	0.95[a]	
	2-羟基-丙酸甲酯	104.047	726	0.01	–	苹果香
	2-2-二甲基丙酸丙酯	144.115	1011	0.02	–	香蕉、菠萝似甜果香
	辛酸甲酯	158.131	1129	0.01[a]	0.01[a]	柑橘与脂肪混合气味
	5-庚基-2(3H)-二氢呋喃酮	184.146	1367	0.02	–	奶油甜味
	邻苯二甲酸二甲酯	194.058	1459	0.01[a]	0.01[a]	果香
	甲酸十二酯	214.193	1526	0.01	–	蜡香、油脂香
	2,2,4-三甲基-3-羧基异丙基戊酸异丁酯	286.214	1599	0.02	–	果香
	十四烷酸甲酯	242.225	1726	0.01	–	椰子香、脂肪香
	十六烷酸甲酯	270.256	1925	0.02	–	脂肪香、蜡香
	丁酸乙酯	116.084	801	–	0.01	菠萝香、甜果香
	2-羟基丙酸乙酯	118.063	814	–	0.11	乳香
	戊酸乙酯	130.099	906	–	0.01	苹果香、青草香
	己酸甲酯	130.099	928	–	0.01	菠萝、香蕉香
	3-甲基丁酸-1-乙烯基-1,5-二甲基-4-己烯酯	238.193	989	–	0.03	果香混合木香味
	己酸乙酯	144.115	1005	–	0.53	苹果、草莓香
	(Z)-3-己烯酸乙酯	142.099	1008	–	0.04	青草香
	2,2-二甲基丙酸癸酯	242.225	1011	–	0.02	椰子、奶油香
	γ-己内酯	114.068	1063	–	0.01	椰子、奶油甜味
	2,6-二甲基-6-三氟乙酰氧基辛烷	254.149	1076	–	0.01	果香、铃兰花香
	4-羟基-5-甲基-3(2H)呋喃酮	114.032	1094	–	0.02	焦糖、麦芽香
	辛酸乙酯	172.146	1201	–	0.03	柑橘与脂肪混合香
	己二酸二甲酯	174.089	1253	–	0.01	桃子、菠萝香
	γ-辛内酯	142.099	1264	–	0.02	奶油、桃子香
	二氢-5-戊基-2(3H)-呋喃酮	156.115	1367	–	0.01	坚果、焦糖香

续表 6

分类	化合物	分子量(Da)	RI	含量(μg/g)		气味特征描述
				冷风	热风	
	(Z)-2-丁二酸二丁酯	228.136	1542	–	0.01	苹果、香蕉香
	2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯	286.214	1599	–	0.04	草莓、菠萝香
	十六酸乙酯	284.272	1992	–	0.01	蜡香、油脂香、果香
芳香烃类				0.17[a]	0.12[a]	
	甲苯	92.063	745	0.01[a]	0.03[a]	芳香气味
	乙苯	106.078	851	0.01[a]	0.01[a]	甜香气味
	1,3-二甲基苯	106.078	860	0.02[a]	0.02[a]	甜香气味
	对二甲苯	106.078	886	0.01[a]	0.01[a]	甜香气味
	1-乙基-3-甲基苯	120.094	957	0.01	–	似水果香甜气味
	萘	128.063	1176	0.02[a]	0.02[a]	焦油味
	1-甲基萘	142.078	1302	0.01	–	焦油味
	1-(1,5-二甲基-4-己烯基)-4-甲基苯	202.172	1480	0.08[a]	0.03[b]	玫瑰、木质香、柑橘类果香
烷烃类				0.56[a]	0.61[a]	
	正己烷	86.110	600	0.22[a]	0.34[b]	刺激性气味
	2,3,4-三甲基戊烷	114.141	840	0.01	–	–
	4-甲基癸烷	156.188	1058	0.01[a]	0.01[a]	微弱油脂香
	十一烷	156.188	1097	0.02	–	–
	3-甲基二十烷	296.344	1168	0.01	–	–
	2,6-二甲基十一烷	184.219	1197	0.11	–	–
	2,6,10-三甲基十四烷	240.282	1277	0.03	–	微弱蜡香、脂肪香
	6-甲基十八烷	268.313	1296	0.03	–	–
	十四烷	198.235	1396	0.03	–	–
	十五烷	212.250	1496	0.02	–	微弱蜡香、脂肪香
	十六烷	226.266	1596	0.02	–	–
	十七烷	240.282	1696	0.04	–	–
	十八烷	254.297	1795	0.01	–	–
	3-乙基己烷	114.141	786	–	0.01	–
	(1S)-6,6-二甲基-2-亚甲基双环[3.1.1]庚烷	136.125	970	–	0.04	松木香
	癸烷	142.172	997	–	0.02	微弱蜡香
	3-甲基-5-丙基壬烷	184.219	1055	–	0.01	–
	3-甲基癸烷	156.188	1060	–	0.01	–
	2,4,6-三甲基癸烷	184.219	1091	–	0.04	松节油味
	3-甲基十一烷	170.203	1168	–	0.02	微弱蜡香、油脂香
	十二烷	170.203	1197	–	0.09	–
	2,6,11-三甲基十二烷	212.250	1277	–	0.01	–
	2,3,5,8-四甲基癸烷	198.235	1340	–	0.01	–
萜烯类				1.26[a]	0.42[b]	
	3-卡琳	136.125	926	0.02	–	木质香
	坎芬尼	136.125	941	0.04	–	木质、樟脑、松脂香
	α-水芹烯	136.125	1000	0.02[a]	0.03[a]	清新柑橘味、薄荷香
	α-蒎烯	136.125	1005	0.12[a]	0.02[b]	松木、松针香
	蒎烯			0.72[a]	0.02[b]	
	1,5,5-三甲基-6-亚甲基环己烯	136.125	1084	0.02	–	柑橘、木质香
	古巴烯	204.188	1371	0.02[a]	0.01[a]	木质、土质香
	β-依兰烯	204.188	1388	0.02	–	花香、草本香、甜润果香
	异石竹烯	204.188	1402	0.02[a]	0.01[a]	木质、树脂香
	石竹烯	204.188	1414	0.10[a]	0.12[a]	木质香
	香树烯	204.188	1488	0.01	–	松香、木质香
	1-甲基-4-(6-甲基庚-5-烯-2-基)环己-1,4-二烯	204.188	1492	0.05		果香
	β-红没药烯	204.188	1506	0.06	–	柑橘皮味
	β-倍半水芹烯	204.188	1521	0.04	–	草本、泥土香
	茨烯	136.125	941	–	0.01	清凉樟脑、木松香
	樟脑	152.120	1147	–	0.03	薄荷、松节油香

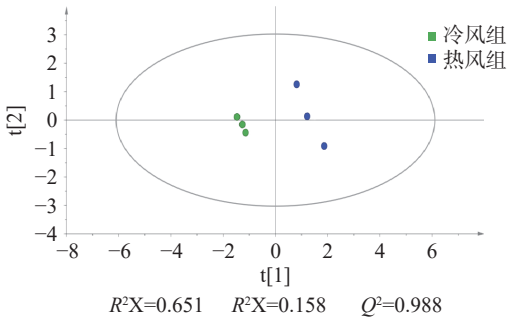
续表 6

分类	化合物	分子量(Da)	RI	含量(μg/g)		气味特征描述
				冷风	热风	
	巨豆三烯	176.157	1185	–	0.02	青草、干燥木质香
	3,7-二甲基-2,6-辛二烯-1-醇	154.136	1294	–	0.02	柠檬、玫瑰香
	葎草烯	204.188	1449	–	0.01	草本、木香
	花柏烯	204.188	1488	–	0.01	松木香
	2-甲基-5-(1,5-二甲基-4-己烯基)-1,3-环己二烯	204.188	1492	–	0.07	木香、辛香、微甜脂香
	α-没药烯	204.188	1506	–	0.02	木质香
	3-(1,5-二甲基-4-己烯基)-6-亚甲基环己烯	204.188	1521	–	0.02	雪松香
吡啶				1.08[a]	0.64[b]	
	2,3,6-三甲基吡啶	121.089	1023	1.08[a]	0.64[b]	焦油味、辛辣味
其他				0.15[a]	0.05[b]	
	2,2-二甲基氧杂环丁烷	86.073	624	0.04	–	–
	4-烯丙基-2-甲氧基苯酚	164.084	1358	0.03	–	丁香味
	2,5-二甲基己烷-2,5-过氧化氢	178.121	1364	0.06	–	–
	丁香酚	164.034	1358	–	0.01	丁香味
	山梨酸	112.052	1101	–	0.02	脂肪香
	3,4-二甲基噻吩	112.035	899	–	0.01	焦油味
	2-巯基-3,4-二甲基-2,3-二氢噻吩	146.022	1126	–	0.01	焦油味
	正癸酸	172.146	1381	0.02	–	蜡质、奶酪味

注: “–”表示未检出或未查到; 气味特征描述来源于参考文献[36]以及网站www.flavornet.org/flavornet.html。

的还原转化以及脂肪酸二级氢过氧化物的降解作用[33], 通常具有植物和香料的香味[34], 有研究认为 1-辛烯-3-醇是导致异味产生的重要因素[35], 在风干过程中减少该化合物的形成有利于肉制品加工风味。醛类化合物阈值较低, 但对鱼干制品整体风味具有重要贡献, 冷风风干工艺下, 鉴定出 7 种醛类物质, 热风风干时有 15 种, 己醛、庚醛、苯乙醛、癸醛等仅在热风中检出, 其中庚醛被认为是鱼腥味的主要来源物质。己醛含量丰富, 表现出青草味。吴燕燕等[36] 发现己醛是食品腌制时的关键氧化产物, 因此可通过改变腌制与干制条件, 调控庚醛、壬醛等物质生成, 改善产品风味。酯类化合物是羧酸和醇类酯化的产物[37], 热风风干时含量显著高于冷风, 推断热风条件下更易发生酯化反应。萜烯化合物具有花香、木香、果香[38]。两种风干方式中石竹烯含量最高, 其次为 α-蒎烯, 李涵等[39] 认为该类化合物的生成与加入的香辛料有关, 其具有辛辣木质香, 可掩盖部分脂肪氧化异味。

2.4.2 风干鱼差异性风味物质分析 为进一步分析不同风干方式风味的差异, 采用 PLS-DA 模型分析(图 6), 其自变量拟合指数 R^2X=0.809, 因变量拟合指数 R^2Y=0.998, 模型预测指数 Q^2=0.988, R^2 和 Q^2 值均高于 0.800, 说明样本具有较好的分化效果。变量投影重要度(VIP)(图 7)结合热图(图 8)分析, 不同风干方式下风干鱼肉主要风味物质种类和含量存在明显差异。VIP 值>1 的挥发性化合物共有 23 种, 其中冷风风干时含量较高的化合物有 8 种, 分别有 1-(1,5-二甲基-4-己烯基)-4-甲基苯、2,6-二甲基十一烷、α-蒎烯、1-甲基-4-(6-甲基庚-5-烯-2-基)环己-1,4-二烯、β-红没药烯、2,2-二甲基氧杂环丁烷、2,3,6-三甲基吡啶、2,5-二甲基己烷-2,5-过氧化氢, 热风风干有 15 种, 分别有己酸乙酯、丙酮、2-十一酮、甲醇、乙醇、己醛、癸醛、2-羟基丙酸乙酯、十二烷、芳樟醇、香叶醇等, 其形成的挥发性物质种类较多, 主要为醇类和酯类, 由于美拉德反应、脂质氧化及热降解反应的协同作用, 提升了草鱼干的风味。综上, 关



R^2X=0.651 R^2X=0.158 Q^2=0.988

图 6 不同风干方式 PLS-DA 模型得分散点图

Fig.6 Score scatter plot of PLS-DA models for different drying methods

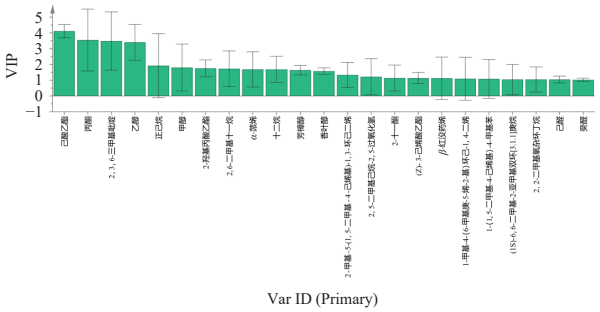


图 7 不同风干方式 VIP 得分图

Fig.7 VIP scores of different air-drying methods

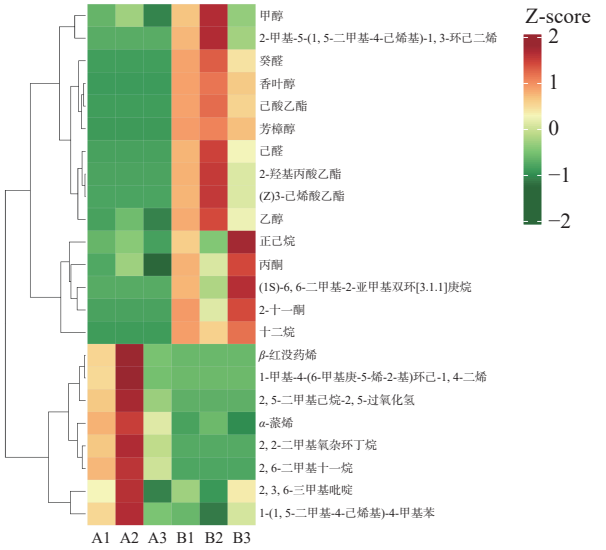


图 8　不同风干方式聚类热图

Fig.8　Heat map of clustering of different air-drying methods

注：A 组为冷风组；B 组为热风组。

键挥发性风味物质的差异是气味成分存在差异的重要因素，使风干草鱼的风味特征更丰富。此外，关键风味物质间的相互影响，对产品的整体风味形成也发挥着重要作用。

3　结论

本研究对新疆博湖草鱼进行腌制工艺优化，从香气特征角度分析了冷风与热风两种不同干燥处理下鱼肉风味差异。结果表明，风干鱼最佳腌制工艺条件为超声功率 200 W、真空度 0.06 MPa、超声时间 30 min、盐添加量 1.5%，此条件下模糊数学感官评分达 87.6 分。应用质谱联用方法在不同风干方式下鱼肉中共检测到 126 种挥发性物质，酯类 27 种，萜烯类 23 种，烷烃类 23 种，醛类 15 种，酮类 10 种，醇类 11 种，芳香烃类 8 种，吡啶类 1 种，其他 8 种。不同风干方式草鱼制品挥发性物质种类和含量具有显著差异。通过 PLS-DA 和聚类热图筛选出 23 种化合物，可作为香气挥发性标志物，其中冷风风干筛选出 8 种挥发性物质，由芳香烃、烷烃、萜烯类组成，具有松香、花香、果香，热风风干有 15 种，主要有酯类、酮类、醇类、萜烯类，表现出浓郁的油脂香、果香、奶油香，热风干燥过程促进了草鱼的脂质氧化水解，使草鱼干制品表现出更优的风味品质，可为工业化生产草鱼干制品的风味调控及品质评价提供理论依据。

© 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] 农业农村部. 水产育种取得新突破首个草鱼新品种‘沪苏 1 号’问世[J]. 水产科技情报, 2024, 51(6): 403−404. [Ministry of Agriculture and Rural Affairs. New breakthrough in aquatic breeding: The first new grass carp variety 'Hu-Su No. 1' was introduced[J]. Fisheries Science & Technology Information, 2024, 51(6): 403−404.]

[2] 夏雨婷, 吴伟伦, 章蔚, 等. 真空辅助加压腌制对草鱼块品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(1): 70−77. [XIA Y T, WU W L, ZHANG W, et al. Effect of vacuum-assisted pressure curing on the quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) blocks[J]. Food Science, 2023, 44(1): 70−77.]

[3] 白恒丽, 李来好, 吴燕燕, 等. 基于超声联合滚揉腌制改善低盐预制调理海鲈鱼品质特性[J]. 食品科学, 2024, 45(14): 161−171. [BAI H L, LI L H, WU Y Y, et al. Quality improvement of low-salt prepared sea bass (*Lateolabrax japonicus*) fillets using ultrasound-assisted tumbling curing[J]. Food Science, 2024, 45(14): 161−171.]

[4] INGUGLIA E S, ZHANG Zhihang, BURGESS C, et al. Influence of extrinsic operational parameters on salt diffusion during ultrasound assisted meat curing[J]. Ultrasonics, 2018, 83: 164−170.

[5] 于秋影, 赵宏蕾, 常婧瑶, 等. 新型滚揉技术在肉制品加工中应用的研究进展[J]. 食品科学, 2022, 43(17): 380−388. [YU Q Y, ZHAO H L, CHANG J Y, et al. Research progress on application of novel tumbling technology in meat product processing[J]. Food Science, 2022, 43(17): 380−388.]

[6] 孟祥忍, 刘宗振, 吴鹏, 等. 不同腌制方式对扬州盐水鹅预制品品质的影响[J]. 食品工业科技, 2023, 44(9): 104−110. [MENG X R, LIU Z Z, WU P, et al. Effects of different curing methods on quality of Yangzhou salted goose semi-finished products[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(9): 104−110.]

[7] 张桓, 许志诚, 张兆丽, 等. 不同腌制方式对盐水鹅生坯保水性及蛋白质氧化的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(4): 87−92. [ZHANG H, XU Z C, ZHANG Z L, et al. Effects of different curing methods on water holding capacity and protein oxidation of salted goose raw materials[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(4): 87−92.]

[8] 周亚军, 张漫漫, 李宗坪, 等. 腌制方式对腌制过程中山黑猪肉肌原纤维蛋白特性及其叉烧肉食用品质的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(23): 86−94. [ZHOU Y J, ZHANG M M, LI Z P, et al. Effects of curing methods on myofibrillar protein characteristics of mountain black pork during curing process and eating quality of charsiu[J]. Food Science, 2023, 44(23): 86−94.]

[9] 佟荟全, 杨丽芳, 肖志超, 等. 超声联合滚揉腌制对鸡胸肉品质的影响研究[J]. 核农学报, 2022, 36(4): 777−787. [TONG H Q, YANG L F, XIAO Z C, et al. Effects of ultrasound combined with tumbling curing on quality of chicken breast[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2022, 36(4): 777−787.]

[10] 李可, 闫路辉, 栗俊广, 等. 不同腌制方式对猪排骨品质的影响[J]. 食品工业, 2019, 40(10): 128−132. [LI K, YAN L H, LI J G, et al. Effects of different curing methods on quality of pork ribs[J]. Food Industry, 2019, 40(10): 128−132.]

[11] 高子武, 吴丹璇, 王恒鹏, 等. 腌制方式对牛肉肌原纤维蛋白特性及水分分布的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(24): 179−186. [GAO Z W, WU D X, WANG H P, et al. Effects of curing methods on myofibrillar protein characteristics and water distribution of beef[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(24): 179−186.]

[12] OJEDIRAN J O, OKONKWO C E, ADEYI A J, et al. Drying characteristics of yam slices (*Dioscorea rotundata*) in a convective hot air dryer: Application of ANFIS in the prediction of drying kinetics[J]. Heliyon, 2020, 6(3): e03555.

[13] 吴永祥, 俞昌浩, 刘刚, 等. 黄山臭鳜鱼热风干燥动力学及其品质特性[J]. 中国食品学报, 2023, 23(8): 286−295. [WU Y X, YU C H, LIU G, et al. Hot-air drying kinetics and quality characteristics of Huangshan stinky mandarin fish[J]. Journal of Chinese In-

stitute of Food Science and Technology, 2023, 23(8): 286−295.]
[14] YU Dawei, FENG Tianyi, JIANG Qixing, et al. The change characteristics in moisture distribution, physical properties and protein denaturation of slightly salted silver carp (*Hypophthalmichthys molitrix*) fillets during cold/hot air drying processing[J]. Lwt, 2021, 137: 110466.
[15] 邓康处. 新疆“两山”转化新路径推动渔业高质量发展的探索[J]. 中国水产, 2024(12): 67−68. [DENG K C. Exploration of new pathways for the "Two Mountains" transformation to promote high-quality development of fisheries in Xinjiang[J]. China Fisheries, 2024(12): 67−68.]
[16] 鲍佳丽. 巴沙鱼片预调理食品加工关键技术研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2022. [BAO J L. Research on key processing technologies of prepared pangasius fillet products[D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2022.]
[17] NIE Shi, LI Laihao, WANG Yueqi, et al. Discrimination and characterization of volatile organic compound fingerprints during sea bass (*Lateolabrax japonicas*) fermentation by combining GC-IMS and GC-MS[J]. Food Bioscience, 2022, 50: 102048.
[18] 刘佳利, 和郁春, 余秋雨, 等. 超声波辅助煮制牛肉传质动力学分析及品质变化研究[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(14): 245−252. [LIU J L, HE Y C, YU Q Y, et al. Ultrasound-assisted cooking of beef: mass transfer kinetics analysis and quality changes [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(14): 245−252.]
[19] ZHOU Yajun, HU Mengqing, WANG Lu. Effects of different curing methods on edible quality and myofibrillar protein characteristics of pork[J]. Food Chemistry, 2022, 387: 132872.
[20] 吴平, 姚芳, 王正云, 等. 超声协同嫩化剂改善淘汰蛋鸡肉嫩度的工艺优化及其对肉品质的影响[J]. 食品工业科技, 2024, 45(12): 56−68. [WU P, YAO F, WANG Z Y, et al. Process optimization of ultrasound combined with tenderizer to improve tenderness of spent hen meat and its effect on meat quality[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(12): 56−68.]
[21] ZHENG Huaisheng, HUANG Chaobin, LIU Shuhong, et al. Effect of ultrasound treatment on the oxidation and conformational structure of myofibrillar protein of beef marinated in red sour soup[J]. Meat Science, 2025, 224: 109779.
[22] 赵改名, 银峰, 祝超智, 等. 滚揉腌制对牛肉盐水火腿品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(15): 72−78. [ZHAO G M, YIN F, ZHU C Z, et al. Effect of tumbling curing on quality of beef brine ham[J]. Food Science, 2020, 41(15): 72−78.]
[23] 田梦瑶, 肖珧, 伍岳, 等. 响应面法优化鸭肉间歇真空滚揉腌制工艺[J]. 中国调味品, 2024, 49(12): 132−136. [TIAN M Y, XIAO Y, WU Y, et al. Optimization of intermittent vacuum tumbling curing process for duck meat by response surface methodology[J]. China Condiment, 2024, 49(12): 132−136.]
[24] DONG Kai, WANG Qia, LI Xiefei, et al. An effective means to improve the flavor quality of traditional fermented sour meat: The salt reduction strategy[J]. Lwt, 2024, 209: 116726.
[25] 吴文霞, 苏长玲, 贺芸, 等. 复合型小龙虾虾壳酶解液调味品开发与风味成分分析[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(10): 270−278. [WU W X, SU C L, HE Y, et al. Development and flavor component analysis of compound condiment from enzymatic hydrolysate of crayfish shell[J]. China Food Additives, 2023, 34(10): 270−278.]
[26] 郭思亚, 蒋美龄, 张崟, 等. 腌制工艺对鲟鱼肉干质构特性的影响[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(14): 75−80. [GUO S Y, JIANG M L, ZHANG Y, et al. Effect of curing process on texture characteristics of dried sturgeon meat[J]. Food Research and Development, 2019, 40(14): 75−80.]
[27] 高山. 绿色安全腊肉加工新技术及其质量控制研究[D]. 成都: 成都大学, 2022. [GAO S. Research on novel processing technology and quality control of green and safe cured meat[D]. Chengdu: Chengdu University, 2022.]
[28] 陈梦婷, 孙智达, 汪兰, 等. 不同盐浓度对超声辅助腌制鲴鱼片品质的影响[J]. 中国调味品, 2022, 47(9): 63−67. [CHEN M T, SUN Z D, WANG L, et al. Effects of different salt concentrations on the quality of ultrasound-assisted cured catfish fillets[J]. China Condiment, 2022, 47(9): 63−67.]
[29] 李心悦, 曹涓泉, 徐静, 等. 超声波辅助腌制对猪肉糜食用品质及凝胶性能的影响[J]. 肉类研究, 2022, 36(8): 21−28. [LI X Y, CAO J Q, XU J, et al. Effects of ultrasound-assisted curing on eating quality and gel properties of minced pork[J]. Meat Research, 2022, 36(8): 21−28.]
[30] 王引兰, 王恒鹏, 孟祥忍. 低频超声辅助静态腌制对鸭肉水分分布及品质特性的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(2): 234−241. [WANG Y L, WANG H P, MENG X R. Effects of low-frequency ultrasound-assisted static curing on water distribution and quality characteristics of duck meat[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(2): 234−241.]
[31] FAN Xiaojing, JIAO Xin, LIU Jinguang, et al. Characterizing the volatile compounds of different sorghum cultivars by both GC-MS and HS-GC-IMS[J]. Food Research International, 2021, 140: 109975.
[32] HE Wang, LIU Zixuan, LIU Haoyue, et al. Characterization of key volatile flavor compounds in dried sausages by HS-SPME and SAFE, which combined with GC-MS, GC-O and OAV[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 133: 106438.
[33] LEI Wenqian, CUI Zhaowei, HU Wanqi, et al. Characterization and comparison of flavor compounds in different specialty chicken meat after stewing[J]. Food Chemistry: X, 2025, 28: 102589.
[34] LI Cong, AL-DALALI S, WANG Zhouping, et al. Investigation of volatile flavor compounds and characterization of aroma-active compounds of water-boiled salted duck using GC–MS–O, GC–IMS, and E-nose[J]. Food Chemistry, 2022, 386: 132728.
[35] CHEN Xing, LUO Jie, LOU Aihua, et al. Duck breast muscle proteins, free fatty acids and volatile compounds as affected by curing methods[J]. Food Chemistry, 2021, 338: 128138.
[36] 吴燕燕, 王悦齐, 李来好, 等. 基于电子鼻与 HS-SPME-GC-MS 技术分析不同处理方式腌干带鱼挥发性风味成分[J]. 水产学报, 2016, 40(12): 1931−1940. [WU Y Y, WANG Y Q, LI L H, et al. Analysis of volatile flavor components in cured hairtail (*Trichiurus lepturus*) with different treatments based on electronic nose and HS-SPME-GC-MS technology[J]. Journal of Fisheries of China, 2016, 40(12): 1931−1940.]
[37] XI Linjie, SUN Yanan, JIANG Shengqi, et al. Evaluation of effects of ultrasound-assisted curing on the flavor of Chinese bacon[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 96: 106424.
[38] LIU Yingying, AL-DALALI S, HU Yan, et al. Effect of different processing steps in the production of beer fish on volatile flavor profile and their precursors determined by HS-GC-IMS, HPLC, E-nose, and E-tongue[J]. Food Chemistry: X, 2024, 23: 101623.
[39] 李涵, 李佳颖, 刘娜, 等. 基于 GC-O-MS 技术的植物肉风味特征及像真性分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(24): 247−258. [LI H, LI J Y, LIU N, et al. Analysis of flavor characteristics and authenticity of plant-based meat based on GC-O-MS technology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(24): 247−258.]