

## 不同卤制条件对酱卤草鱼肉感官品质、理化特性和风味的影响

余亚琴, 谭春明, 聂诗, 田明礼, 涂宗财, 计畅, 张露

### Effects of Different Marinade Conditions on Sensory Quality, Physicochemical Properties and Flavor of Sauced Grass Carp (*Ctenopharyngodon idellus*) Meat

YU Yaqin, TAN Chunming, NIE Shi, TIAN Mingli, TU Zongcai, JI Chang, and ZHANG Lu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024040457>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于电子鼻、气相-离子迁移谱(GC-IMS)法分析广西螺蛳粉与螺蛳鸭脚煲风味

Analysis of the Flavor of Guangxi Luosi-Noodle and Luosi-Hot-Pot by Electronic Nose and Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry (GC-IMS)

食品工业科技. 2021, 42(9): 281-288 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020070197>

#### 气相色谱-离子迁移谱技术在蜂蜜品质鉴评中的应用

Application of Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy for Honey Quality Evaluation

食品工业科技. 2024, 45(13): 402-410 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024010053>

#### 基于气相-离子迁移谱对竹燕窝菌汤风味成分的分析

Analysis of Volatile Flavor Constituents in Bamboo Bird's Nest Soups with Headspace-Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry

食品工业科技. 2020, 41(23): 8-14,24 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020050191>

#### 基于GC-IMS分析粮仓位置效应对稻谷挥发性风味物质的影响

Effect of Storage Positions on the Volatile Flavor Compounds (VFCs) of Paddy Rice through Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy (GC-IMS) Analysis

食品工业科技. 2023, 44(17): 375-382 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022120073>

#### 基于GC-IMS和电子鼻分析牛肉腐败进程中挥发性风味物质的变化

Changes of Volatile Flavor Substances of Beeves in Spoilage Process Based on Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry and Electronic Nose

食品工业科技. 2024, 45(11): 235-244 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023070121>

#### 基于HS-SPME-GC-MS和GC-IMS结合电子鼻分析真空冷却对酱牛肉风味的影响

Analysis of the Effect of Vacuum Cooling on the Flavor of Sauce Beef Based on HS-SPME-GC-MS and GC-IMS Combined with Electronic Nose

食品工业科技. 2022, 43(9): 341-348 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021080267>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

余亚琴, 谭春明, 聂诗, 等. 不同卤制条件对酱卤草鱼肉感官品质、理化特性和风味的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 261–272. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040457

YU Yaqin, TAN Chunming, NIE Shi, et al. Effects of Different Marinade Conditions on Sensory Quality, Physicochemical Properties and Flavor of Sauced Grass Carp (*Ctenopharyngodon idellus*) Meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 261–272. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040457

· 工艺技术 ·

# 不同卤制条件对酱卤草鱼肉感官品质、理化特性和风味的影响

余亚琴<sup>1</sup>, 谭春明<sup>2,\*</sup>, 聂诗<sup>2</sup>, 田明礼<sup>3</sup>, 涂宗财<sup>4</sup>, 计畅<sup>1</sup>, 张露<sup>1,2,\*</sup>

(1.江西师范大学生命科学学院, 国家淡水鱼加工技术研发专业中心, 江西南昌 330022;  
2.江西师范大学健康学院, 江西南昌 330022;  
3.湖南喜味佳生物科技有限公司, 湖南岳阳 414000;  
4.南昌大学食品科学与食物资源挖掘国家重点实验室, 江西南昌 330006)

**摘要:**为了探究温度 (95、65、25、4 °C) 和时间 (0、2、4、6、8 h) 的不同组合条件对酱卤草鱼肉品质的影响。本文以草鱼肉为研究对象, 通过感官评价、理化指标分析和气相色谱串联离子迁移谱 (GC-IMS) 检测, 揭示草鱼肉在不同卤制条件下的感官、理化特性和风味的变化。结果表明, 卤制条件为 65 °C-6 h 和 95 °C-2 h 可以提高草鱼肉的气味、色泽、咀嚼性和总体可接受度; 65 °C-6 h 的卤制条件显著降低了酱卤草鱼肉的蛋白质降解率 ( $P<0.05$ ), 并且该条件下的酱卤草鱼肉具有最低的 TVB-N 含量和相对较低的 TBARS 值。此外, 卤制改变了氨基酸的组成, 65 °C 条件可提高酱卤草鱼的鲜味氨基酸相对含量。GC-IMS 分析结果表明, 65 °C-6 h 的卤制条件可以提高挥发性风味化合物的种类和含量, 从而促进酱卤草鱼风味的产生。综上所述, 选择 65 °C-6 h 的卤制条件有利于提高草鱼的感官品质、理化特性和良好风味的产生。

**关键词:**草鱼, 酱卤, 品质, 气相色谱串联离子迁移谱 (GC-IMS), 风味

中图分类号:TS254.4 文献标识码:B 文章编号:1002-0306(2025)06-0261-12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024040457

本文网刊:



## Effects of Different Marinade Conditions on Sensory Quality, Physicochemical Properties and Flavor of Sauced Grass Carp (*Ctenopharyngodon idellus*) Meat

YU Yaqin<sup>1</sup>, TAN Chunming<sup>2,\*</sup>, NIE Shi<sup>2</sup>, TIAN Mingli<sup>3</sup>, TU Zongcai<sup>4</sup>, JI Chang<sup>1</sup>, ZHANG Lu<sup>1,2,\*</sup>

(1.National R & D Center for Freshwater Fish Processing, College of Life Sciences, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;  
2.School of Health, Jiangxi Normal University, Nanchang 330022, China;  
3.Hunan Xiweijia Biotechnology Co., Ltd., Yueyang 414000, China;  
4.State Key Laboratory of Food Science and Resources, Nanchang University, Nanchang 330006, China)

**Abstract:** To investigate the effect of various temperature (95, 65, 25, 4 °C) and time (0, 2, 4, 6, 8 h) combinations on the quality of marinated grass carp. The research utilized grass carp meat as the subject, employing sensory evaluation, physicochemical index analysis, and gas chromatography ion mobility spectrometry (GC-IMS) technology to reveal the changes in sensory attributes, quality, and flavor under different marination conditions. Results indicated that marination at

收稿日期: 2024-04-30

基金项目: “十四五”国家重点研发计划重点专项 (2022YFD2100902)。

作者简介: 余亚琴 (1998- ) (ORCID: 0009-0006-9866-9088), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工与贮藏, E-mail: yyq\_115@163.com。

\* 通信作者: 谭春明 (1991- ) (ORCID: 0000-0001-6620-7088), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 水产品加工和副产物高值化利用, E-mail: cmtan\_ouc@163.com。

张露 (1987- ) (ORCID: 0000-0003-0800-4762), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 水产品加工和副产物高值化利用, E-mail: zhanglu00104@163.com。

65 ℃ for 6 h or 95 ℃ for 2 h improved the odor, color, chewiness and overall acceptability of grass carp. Specifically, marination at 65 ℃ for 6 h significantly reduced protein degradation rates ( $P<0.05$ ), resulting in the lowest total volatile basic nitrogen (TVB-N) content and a relatively low thiobarbituric acid reactive substances (TBARS) value in the marinated grass carp meat. In addition, marination also altered the composition of amino acids (AAs), increasing the relative content of umami amino acids at 65 ℃. Furthermore, GC-IMS analysis revealed that the 65 ℃ for 6 h marination condition enhanced both the type and content of volatile flavor compounds, thereby promoting the flavor production of marinated grass carp. In conclusion, the 65 ℃ for 6 h marination condition was found to be beneficial for improving the sensory quality, physicochemical properties, and flavor of grass carp.

**Key words:** grass carp; sauce and marinade; quality; gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS); flavor

草鱼(*Ctenopharyngodon idellus*)具有肉质细嫩鲜美、富含多不饱和脂肪酸、高蛋白等优点<sup>[1]</sup>,但是土腥味重、精深加工率低且易出现变质、氧化和腐烂等,严重制约了草鱼产业的发展<sup>[2]</sup>。为了改善草鱼腥味重,提高草鱼精深加工率和食用品质,可以将卤制工艺运用到草鱼的加工过程中,以满足现代消费者对休闲卤制品的巨大需求。卤制品是中国的传统美食之一,具有风味独特、色泽诱人和香味浓郁等特点<sup>[3]</sup>。卤制可以使产品具有更好的色泽、口感和更独特的风味。通过研究卤制过程风味和品质的变化,揭示食品卤制加工过程挥发性风味物质种类和含量的变化规律,并确定影响食品风味的关键化合物,对进一步改善卤制食品的风味和口感具有重要意义。

酱卤鱼独特的风味形成是风味前体物质(如其氨基酸、糖类、脂类等)通过脂质氧化、热降解和美拉德(Maillard)反应生成了各种呈味物质,从而赋予酱卤草鱼独特的风味和口感<sup>[4]</sup>。其中,挥发性风味成分是决定酱卤鱼品质的重要因素之一<sup>[5-6]</sup>。Tao 等<sup>[7]</sup>研究了超高压处理对红烧鳜鱼香气成分的影响,发现烷烃类物质是影响红烧鳜鱼风味最主要的物质,但是没有进一步分析影响红烧鳜鱼风味的关键挥发性风味物质。此外,已有研究表明,卤制过程主要受到温度和时间的影响,而卤制条件变化影响食品的色泽、口感和风味<sup>[8-9]</sup>。万娟等<sup>[10]</sup>采用顶空固相微萃取气相色谱-质谱法(HS-SPME-GC-MS)研究了卤鱼的挥发性风味成分,共检测出 48 种挥发性风味物质,其中主要风味物质是柠檬烯、2-甲基丁醛、己醛、反式-茴香脑、乙酸、1-溴乙基苯。

顶空-气相色谱-离子迁移谱(Headspace-Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy, HS-GC-IMS)技术是近几年迅速发展起来的一门分析挥发性风味物质的技术,这种方法利用各种气相离子通过气相中电场的迁移率差异来识别和检测化合物<sup>[11]</sup>,被广泛用于检测食品挥发性风味物质中的高电负性或高质子亲和性基团,如氨基、疏水基团、酮类和芳香族化合物等<sup>[12]</sup>。目前,已成功运用于多种肉制品的风味分析,包括鸭肉<sup>[12]</sup>、牛肉<sup>[12-14]</sup>、鸡肉<sup>[15]</sup>等。

然而,卤制温度和时间等因素对酱卤鱼的品质、风味的研究较少,且 HS-GC-IMS 在酱卤鱼的风味研究应用更是鲜有报道。因此,本研究主要分析酱卤草鱼在不同卤制温度和时间条件下的感官和理化性质,

并采用 HS-GC-IMS 揭示不同温度和时间下酱卤草鱼肉的风味变化,以期为风味和营养俱佳的酱卤草鱼产品的研发及实际生产应用提供一定的理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与仪器

鲜活草鱼 南昌县长胜大市场提高;食用油、调味料(食盐、味精)、香辛料(八角、桂皮、香叶、丁香、花椒、小茴香、辣椒等) 南昌奥体天虹超市提供;三氯乙酸、2-硫代巴比妥酸(99%)、氢氧化钠和氯化钠 分析纯,上海阿拉丁生化科技有限公司;乙腈 色谱级,上海泰坦科技股份有限公司。

SKD-100 自动凯氏定氮仪 上海沛欧分析仪器有限公司;L-8900 氨基酸分析仪 日本 Hitachi 公司;Synergy H1 酶标仪 美国 Bio Tek 公司;PEN3 电子鼻 美国 Airsense 公司;Flavour Spec® GC-IMS 仪 德国 G.A.S.公司。

### 1.2 实验方法

1.2.1 样品的制备 新鲜草鱼,每条约 1.5 kg,经宰杀,去鳞、去内脏、去头后沿着背鳍两侧剖开将鱼肉切成  $5 \times 2 \times 1.5 \text{ cm}^3$  的鱼排,并加入食用盐、生姜、生抽和料酒混合均匀,常温腌制 1 h,腌制结束后置于鼓风干燥箱中,55 ℃ 烘干 21 h 得到鱼干。将腌制好的鱼干和卤汤按照液料比 1:2 的比例进行卤制,在不同温度和时间的组合条件(95 ℃-2 h、65 ℃-4 h、65 ℃-6 h、25 ℃-6 h、25 ℃-8 h 和 4 ℃-8 h)下进行保温定时定量卤制,卤制结束后立即进行感官评价,每组剩余肉样冷却至室温后均匀分成几份,采用真空包装密封并置于-80 ℃ 冰箱备用,以未卤制的腌制鱼干作为对照组(Bla),并于-80 ℃ 冰箱储藏备用。

1.2.2 感官评价 参考赵玲等<sup>[16]</sup>的方法稍有修改,选择 10 人组成的感官评定小组(均为食品生物化学专业的学生)对产品的气味、色泽、外观、咀嚼性、总体可接受度进行评定,总分 100 分。为减少主观因素对检测结果的影响,对样品进行密码编号(采用 3 位随机数字),在评定过程中检验样品随机化,每个成员之间不接触交流,在评定每个样品前用水漱口。感官评分表见表 1,感官评定以总分计算:总分=气味分×0.2+外观分×0.2+咀嚼性分×0.2+色泽分×0.2+总体可接受度分×0.2。

表 1 感官评价标准  
Table 1 Sensory evaluation form

指标		评分标准					
气味 (100分)	鱼腥味 (25分)	无鱼腥味 (21~25)	鱼腥味较弱 (16~20)	鱼腥味一般 (11~15)	鱼腥味较强 (6~10)	鱼腥味强烈 (1~5)	鱼腥味无法接受(0)
	鲜味 (25分)	鲜味浓郁 (21~25)	鲜味强烈 (16~20)	鲜味一般 (11~15)	鲜味较弱 (6~10)	基本无鲜味 (1~5)	无任何鲜味(0)
	苦味 (25分)	无苦味 (21~25)	有轻微苦味 (16~20)	苦味一般 (11~15)	苦味较强 (6~10)	苦味强烈 (1~5)	苦味无法接受(0)
	咸味 (25分)	咸淡适中 (21~25)	微咸或微淡 (16~20)	较咸或较淡 (11~15)	咸味较强或较不足 (6~10)	咸味强烈或咸味不足 (1~5)	咸味无法接受或 无咸味(0)
外观 (100分)	鱼块完整,组织紧密 (81~100)	鱼块较为完整, 组织较为紧密 (61~80)	鱼块完整度一般 (41~60)	鱼块组织较为不紧 密,边缘较松散 (21~40)	鱼块不完整,松散严 重(1~20)	无完整鱼块且 不定型(0)	
	咀嚼性 (100分)	软硬适中,有嚼劲 (81~100)	微软或微硬,较有嚼 劲(61~80)	软硬度一般,嚼劲一 般(41~60)	较软或较硬,嚼劲较 差(21~40)	偏软或偏硬,嚼劲差 (1~20)	过硬或者过软, 毫无嚼劲(0)
色泽 (100分)	呈棕褐色,颜色均一, 表面光泽明显 (81~100)	呈棕色,颜色较为一 致,表面光泽较强 (61~80)	呈棕黄色,颜色较 均一,表面光泽一般 (41~60)	偏黄,颜色较为不均 一,表面光泽较淡 (21~40)	色泽泛黄,颜色明显 不均一,表面些许 光泽(1~20)	色泽偏白,表面毫 无光泽(0)	
	总体可接受度 (100分)	可接受度高 (81~100)	可接受度较高 (61~80)	可接受度一般 (41~60)	可接受度较差 (21~40)	可接受度差 (1~20)	无法接受 (0)

1.2.3 水分含量测定 取大于或等于 0.5 g 的鱼肉样品, 使用水分含量测定仪进行水分含量的测定。

1.2.4 蛋白质含量测定 参照 GB 5009.228-2016 中《食品安全国家标准食品中蛋白质的测定》的方法并稍作修改。称取 0.20 g 鱼肉于消化管中, 依次加入硫酸铜、硫酸钾以及浓硫酸(0.5 g、4.5 g 和 10 mL)进行消化, 消化结束后上机检测。指示剂为硼酸溶液、溴甲酚绿和甲基红, 蒸馏 4 min 后用 0.1 mol/L 盐酸标准溶液进行滴定, 用 20 mL 蒸馏水作为空白对照, 颜色变为淡粉色后终止, 记录滴定的盐酸体积, 粗蛋白含量按照如下公式计算:

$$\text{粗蛋白含量}(\%) = \frac{(V_1 - V_2) \times c \times 0.0140}{m} \times F \times 100$$

式中:  $V_1$ 、 $V_2$  分别表示样品和空白消耗的盐酸标准滴定溶液体积, mL;  $c$  表示盐酸标准滴定溶液浓度, mol/L;  $m$  表示样品质量, g; 0.0140 表示滴定 1 mL 盐酸标准滴定溶液相当于氮的摩尔质量, g/mol;  $F$  表示氮换算成蛋白质的系数; 100 为单位换算系数。

1.2.5 挥发性盐基氮(TVB-N)含量测定 参照 GB 5009.228-2016 中《食品安全国家标准食品中挥发性盐基氮的测定》的方法并稍作修改。称取 4.0 g 搅碎后的鱼肉于消化管中, 加入 20 mL 蒸馏水以及 1.0 g 氧化镁, 上机检测, 吸收指示剂为硼酸溶液、溴甲酚绿和甲基红, 蒸馏 4 min 后用 0.05 mol/L 盐酸标准滴定溶液进行滴定, 用 20 mL 蒸馏水作为空白对照, 颜色变为淡粉色后终止, 记录滴定的盐酸体积。总挥发性盐基氮(Total Volatile Base Nitrogen, TVB-N)含量按照如下公式计算:

$$\text{TVB-N}(\text{mg}/100 \text{ g}) = \frac{(V_1 - V_2) \times c \times 14}{m} \times 100$$

式中:  $V_1$ 、 $V_2$  分别表示样品和空白消耗的盐酸标准滴定溶液体积, mL;  $c$  表示盐酸标准滴定溶液浓度, mol/L;  $m$  表示样品质量, g; 14 表示滴定 1 mL 标

准样品相当于氮的摩尔质量, g/mol; 100 为单位换算系数。

1.2.6 硫代巴比妥酸值(TBARS)测定 参照 Ali 等<sup>[17]</sup>的方法并稍作修改, 取 5.0 g 草鱼肉中加入 25 mL 的 20% 三氯乙酸溶液和 20 mL 蒸馏水, 常温静置 30 min 后, 7500 r/min 转速下离心 10 min, 取上清液定容到 50 mL。取 2 mL 上述溶液与 2 mL 的 TBA(0.02 mol/L)振荡混匀, 置于沸水浴中 40 min, 冷却后在 532 nm 和 600 nm 处测定吸光值, TBARS 值按照如下公式计算, 结果表示为  $\mu\text{g}/\text{kg}$  样品。

$$\text{TBARS}(\mu\text{g}/\text{kg}) = \frac{A_{532} - A_{600}}{R} \times M \times 2$$

式中: TBARS 为样品中丙二醛(MDA)的含量,  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ;  $A_{532}$  为样品在 532 nm 处的吸光度;  $A_{600}$  为样品在 600 nm 处的吸光度;  $M$  为丙二醛的相对分子质量, 72.06;  $R$  为毫摩尔吸光系数, 155。

1.2.7 氨基酸含量测定 参照 GB 5009.124-2016 《食品安全国家标准食品中氨基酸的测定》的方法并稍作修改。称取 2.0 g 鱼肉样品, 加入 15 mL 6 mol/L 盐酸溶液, 并加入苯酚 3 滴, 冷冻 3 min 后抽真空并充氮气, 重复三次, 封口后置于 110 °C 的鼓风干燥箱中水解 22 h, 取 1.0 mL 过 0.22  $\mu\text{m}$  滤膜, 采用氨基酸自动分析仪检测。味觉活性值(Taste Activity Value, TAV)按下式计算:

$$\text{TAV} = \frac{\text{滋味物质的浓度}}{\text{滋味物质的阈值}}$$

1.2.8 电子鼻分析 参考 Lan 等<sup>[18]</sup>的方法稍有修改, 称取 2.0 g 鱼肉样品置于 50 mL 离心管中, 用(四层)保鲜膜密封, 50 °C 水浴平衡 30 min, 插入电子鼻探头进行测定。测定条件: 清洗时间 120 s, 归零时间 5 s, 准备时间 5 s, 测定时间 140 s, 载气速度为 600 mL/min, 进样流量为 600 mL/min, 特征值提取

时间设定为137~139 s。

### 1.2.9 HS-GC-IMS分析

**1.2.9.1 样品处理** 参考Wu等<sup>[19]</sup>的方法略有修改,称量2.0 g绞碎的鱼肉,置于20 mL顶空瓶中,孵育温度60 °C,孵育时间15 min,孵化转速500 r/min,顶空进样量100 μL,进样针温度65 °C。

**1.2.9.2 GC检测条件** 色谱柱Agilent DB-wax毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm);柱温60 °C;载气为高纯N<sub>2</sub>(纯度≥99.999%),载气程序为:柱流速初始为2 mL/min,保持2 min,2~10 min柱流速线性增加至10 mL/min,10~20 min柱流速线性增加至100 mL/min,20~30 min柱流速线性增加至150 mL/min。

**1.2.9.3 IMS检测条件** 漂移管长度9.8 cm;管内线性电压400 V/cm;IMS温度65 °C;漂移气为高纯N<sub>2</sub>(纯度≥99.99%).利用Flavor Spec风味分析仪进行物质图谱分析,使用GC×IMS Library Search软件内置NIST数据库和IMS数据库定性。

**1.2.10 ROAV计算** ROAV是一种根据阈值判断化合物的重要方法,计算公式如下:

$$ROAV_i \approx \frac{C_i}{T_i} \times \frac{T_{stan}}{C_{stan}} \times 100$$

式中:C<sub>stan</sub>为最大化合物相对含量(%);T<sub>stan</sub>为最大化合物阈值(μg/kg);C<sub>i</sub>为某种化合物相对含量(%);T<sub>i</sub>为某种挥发性化合物阈值(μg/kg)。

### 1.3 数据处理

所有试验均做3次平行,结果以平均值±标准差表示,实验数据采用Origin 2021绘图,用SPSS 16.0统计软件对数据进行单因素方差分析(ANOVA),显著性差异分析采用Duncan检验,P<0.05表示存在显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 感官评价分析

感官评价是影响消费者是否购买酱卤草鱼最重要和最直观的影响因素之一。感官评价结果如图1所示,除了外观外,不同条件卤制的草鱼的感官

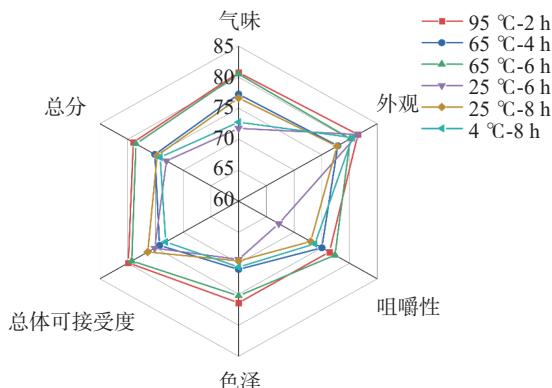


图1 酱卤草鱼感官评价雷达图

Fig.1 Radar chart of sensory evaluation of marinated grass carp

评价得分均有差异,其中卤制条件为95 °C-2 h和65 °C-6 h的酱卤草鱼总分最高,分别为78.98分、78.5分,并具有良好的气味、诱人的色泽、较好的咀嚼性以及较高的总体可接受度。而常温(25 °C)卤制和低温(4 °C)卤制降低了酱卤草鱼的感官评分和总体可接受度,在色泽、气味和咀嚼性方面评分均有降低。可见,当卤制条件为95 °C-2 h和65 °C-6 h时,酱卤草鱼更受消费者的喜爱。

### 2.2 水分和蛋白质含量变化分析

水分含量如图2A所示,由于食盐的渗透作用,95 °C-2 h、65 °C-4 h、65 °C-6 h、25 °C-6 h、25 °C-8 h和4 °C-8 h六个处理组的水分含量均比未卤制组显著增加(P<0.05),分别增加了19.86%、19.82%、23.40%、24.31%、21.46%和20.01%;高温短时卤制和低温长时卤制的水分含量差异不显著(P>0.05),尤其是95 °C-2 h和4 °C-8 h,可见温度对鱼肉水分迁移速率的影响大于时间。Wang等<sup>[20]</sup>的研究结果也指出,烹饪温度对耗牛水分的影响大于时间。这可能是由于高温使鱼肉的胶原蛋白变性以及盐溶性肌原纤维蛋白成凝胶状,使鱼肉的保水性增加;而低温条件下,鱼肉的盐分逐渐和卤汤中的达到一致,内外渗

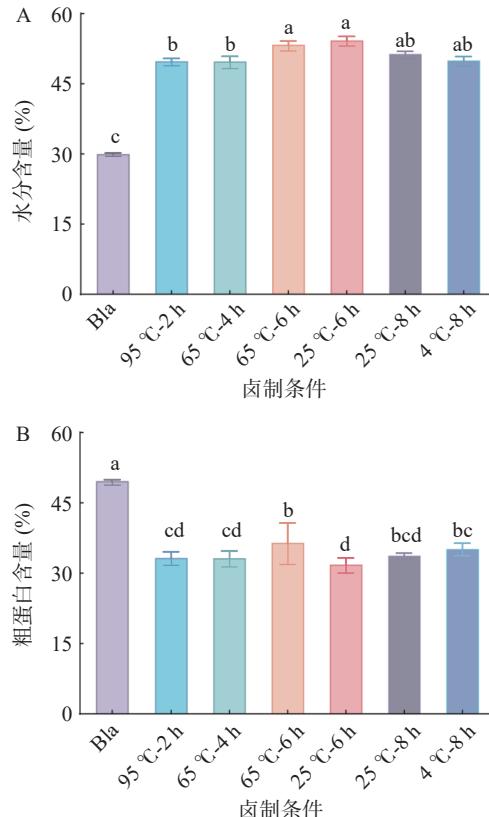


图2 不同卤制条件组合对草鱼水分含量(A)和粗蛋白质含量(B)的影响

Fig.2 Effects of different combinations of marinating conditions on moisture content (A) and protein content (B) of grass carp

注:小写字母表示不同卤制条件酱卤草鱼的差异显著(P<0.05),图3同。

透压逐渐趋于平衡, 使得卤汤不断进入鱼肉中, 最终导致水分含量增加<sup>[21]</sup>。

粗蛋白含量如图 2B 所示, 与对照组相比, 所有处理组的草鱼肉粗蛋白含量呈现显著下降的趋势 ( $P<0.05$ ), 从而导致营养损失。一方面可能是草鱼肉中的水溶性蛋白质部分流失, 该结果与 Yuan 等<sup>[22]</sup>研究结果一致; 另一方面可能是随着卤制时间的延长和卤制温度的升高, 蛋白质逐渐降解成多肽和含氮化合物, 而含氮化合物可能会转变为其他物质, 从而降低粗蛋白的含量。此外, 65 ℃-6 h 组的鱼肉其蛋白质含量(36.48%)显著( $P<0.05$ )高于其他卤制组, 说明该温度和时间组合可以降低蛋白质的分解并减少营养损失。

### 2.3 挥发性盐基氮 (TVB-N) 含量分析

TVB-N 是由微生物和内源酶活性引起的蛋白质脱羧、脱氨作用的产物, 是衡量鱼肉腐败程度的重要指标<sup>[23]</sup>。如图 3A 示, 对照组的 TVB-N 值较高, 为 58.54 mg/100 g, 这可能是由于鱼肉烘干过程中蛋白质降解成含氮化合物和多肽, 从而导致 TVB-N 值较高。高瑞昌等<sup>[24]</sup> 和章佳佳等<sup>[25]</sup> 在研究干燥条件对鱼肉 TVB-N 含量的影响时发现, 半干鱼肉的 TVB-N 值均显著( $P<0.05$ )高于 20 mg/100 g, 其中烘干 15 h 时 TVB-N 含量达到了 60.23 mg/100 g。然而, 卤制组的 TVB-N 含量显著( $P<0.05$ )降低, 可能是挥

发性盐基氮与卤汤中的某些物质发生反应转变为其他物质, 并溶出到卤汤中, 从而降低鱼肉中的含量。结果显示 65 ℃-6 h 的卤制条件下鱼肉的挥发性盐基氮含量最低(23.01 mg/100 g), 说明该条件的酱卤草鱼品质较高。此外, 已有研究表明蛋白质的适度降解产生游离氨基酸, 游离氨基酸作为中间体参与美拉德反应生成酮、醛、醇、呋喃及其衍生物和芳香族化合物, 并促进挥发性风味物质的产生<sup>[26]</sup>。可见, 65 ℃-6 h 的卤制条件可以改善酱卤草鱼的品质并促进其特征风味的产生。

### 2.4 硫代巴比妥酸 (TBARS) 值分析

TBARS 值是评价水产品脂肪氧化程度和风味生产的重要指标<sup>[27]</sup>, 适当的脂肪氧化会产生多种良好的风味物质, 而过量则会影响食品的品质。如图 3B 所示, 与对照组相比, 当温度达到 65 ℃ 以上时, 草鱼的 TBARS 值显著( $P<0.05$ )下降, 可能是因为 65 ℃ 以上会抑制鱼肉中微生物的生长和繁殖, 并降低内源酶活性, 减缓脂肪氧化产生醛、酮等物质, 从而使 TBARS 值下降<sup>[28-29]</sup>。其中, 65 ℃-6 h 的 TBARS 值(87.09 μg/kg)显著( $P<0.05$ )低于 65 ℃-4 h(102.59 μg/kg), 这是由于时间的延长导致脂肪氧化产物与含氮类化合物发生反应, 如氨基酸、DNA 和蛋白质等<sup>[30]</sup>, 从而导致 65 ℃-6 h 的 TBARS 值下降。

### 2.5 氨基酸含量分析

氨基酸能通过 Strecker 降解和美拉德反应产生挥发性风味化合物, 不同的氨基酸呈现出的口感和风味有所不同。如图 4A 热图所示, 样本聚成两大类, 说明卤制可以改变氨基酸的组成和含量, 除精氨酸和天冬氨酸外, 其他氨基酸均在未卤制组中具有较高的含量, 然而精氨酸和天冬氨酸分别在 65 ℃-4 h、25 ℃-8 h 中有较高含量(122.67 mg/100 g, 30.00 mg/100 g)。这可能跟不同温度-时间卤制过程中水分丢失和香辛料中氨基酸溶出有关。杨要芳等<sup>[31]</sup>也发现牡蛎干制导致天冬氨酸含量降低, 而卤汤配料(香辛料和调味料)能显著影响卤制过程中肉的氨基酸含量<sup>[32]</sup>, 从而导致精氨酸和天冬氨酸在 65 ℃-4 h、25 ℃-6 h 条件下的含量差异。甜味、苦味、鲜味氨基酸相对含量如图 4B 所示, 除 95 ℃-2 h 和 4 ℃-8 h 外, 其他组比对照组的鲜味氨基酸相对含量增加, 而苦味氨基酸和甜味氨基酸降低, 具体原因有待进一步探究。表 2 中滋味活度(TVA)大于 1 表示该种氨基酸对于酱卤草鱼的滋味贡献率较大, 反之, 则表示贡献率不大。在处理组和对照组中, 谷氨酸含量最高并且滋味活度值(TAV)也远大于 1, 其次是组氨酸, 说明鲜味物质在腌制鱼和卤制鱼中均占主要作用, 且具有苦味回甘的特殊风味。此外, 温度可能会影响鱼肉卤煮过程中蛋白质的氧化水平, 从而引起氨基酸含量的变化<sup>[33]</sup>。

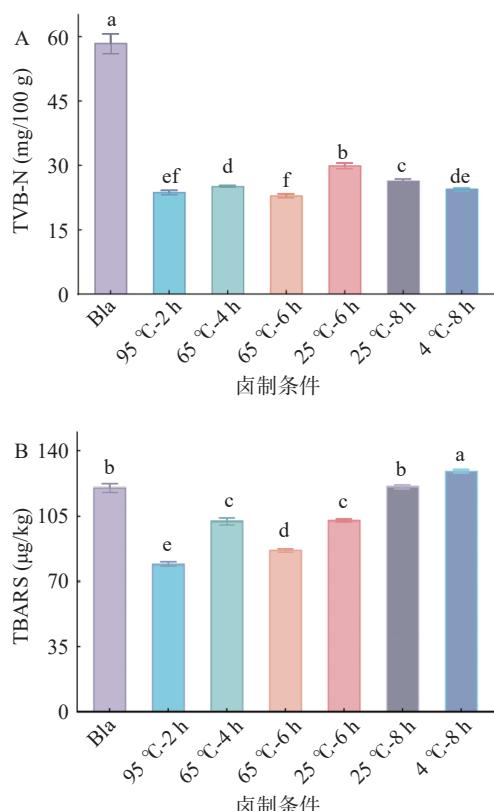


图 3 不同卤制条件组合对草鱼 TVB-N 含量(A)和 TBARS 值(B)的影响

Fig.3 Effects of different combinations of marinating conditions on TVB-N content (A) and TBARS value (B) of grass carp

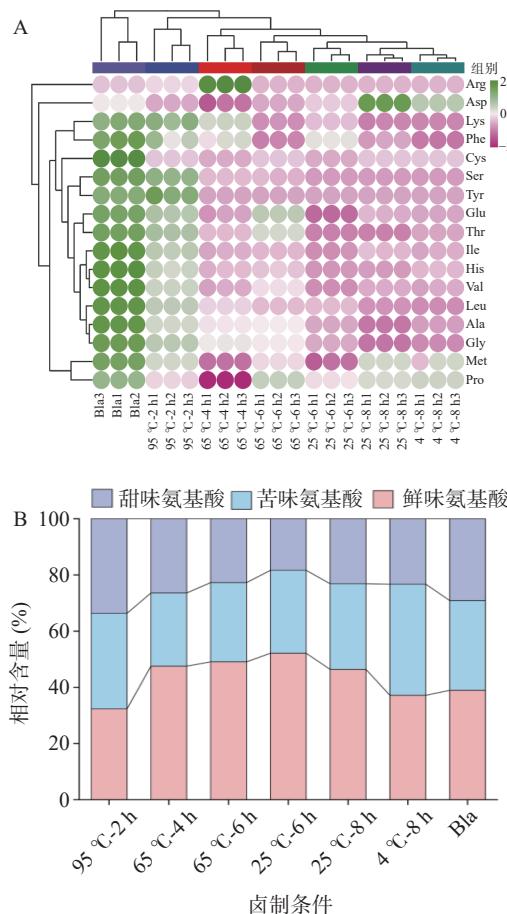


图4 酱卤草鱼的氨基酸含量的聚类热图(A)和甜味、苦味和鲜味氨基酸的相对含量堆叠图(B)

Fig.4 Clustered heat map of amino acid content (A) and stacked map of relative content of sweet, bitter and fresh amino acids (B) in marinated grass carp

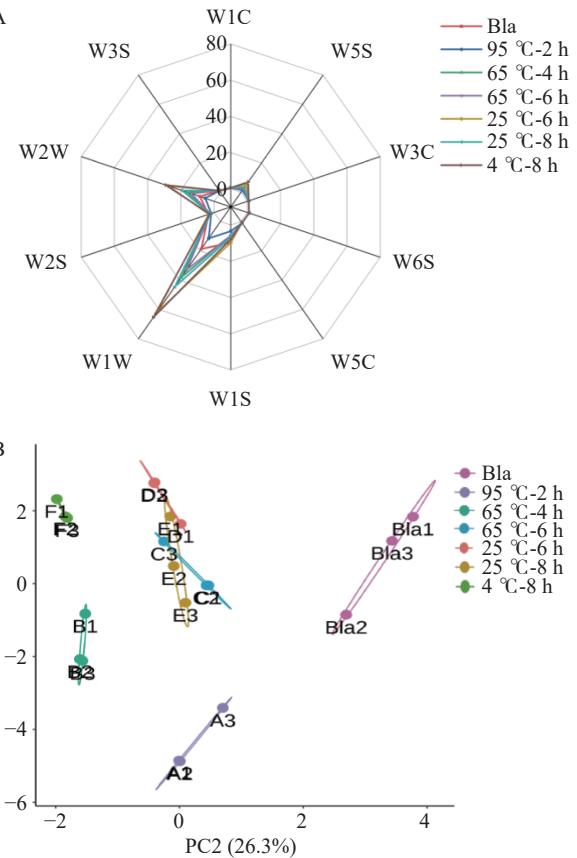


图5 酱卤草鱼电子鼻的雷达图(A)和主成分分析图(B)

Fig.5 Radar diagram (A) and principal component analysis (B) of marinated grass carp E-nose

注: 图B中的 Bla 表示未卤制组(Bla), A~F 分别表示卤制条件为 95 °C-2 h, 65 °C-4 h, 65 °C-6 h, 25 °C-6 h, 25 °C-8 h, 4 °C-8 h 组。

表2 不同卤制条件下草鱼肉的氨基酸TAV

Table 2 Amino acid TAV of grass carp meat at different marinating temperatures

氨基酸	呈味特性	Bla	4 °C-8 h	25 °C-8 h	25 °C-6 h	65 °C-6 h	65 °C-4 h	95 °C-2 h
Asp	鲜味	0.24	0.22	0.26	0.30	0.23	0.20	0.22
Thr	甜味	0.12	0.06	0.02	/	0.00	0.03	0.08
Ser	甜味	0.17	0.02	0.00	/	0.00	0.02	0.13
Glu	鲜味	13.32	11.76	9.97	10.12	8.96	9.84	11.94
Gly	甜味	0.57	0.22	0.05	0.01	0.12	0.24	0.34
Ala	甜味	1.60	0.58	0.25	0.03	0.30	0.56	0.77
Cys	无味	/	/	/	/	/	/	/
Val	苦味	1.10	0.58	0.47	0.48	0.40	0.47	0.70
Met	苦味	0.50	0.27	0.30	0.33	0.12	0.13	0.33
Ile	苦味	0.45	0.11	0.10	0.11	0.06	0.10	0.25
Leu	苦味	0.29	0.09	0.06	0.06	0.09	0.11	0.17
Tyr	苦味	/	/	/	/	/	/	/
Phe	苦味	0.72	0.21	0.18	0.27	0.42	0.42	0.50
Lys	无味	0.64	0.09	0.06	0.05	0.20	0.39	0.59
His	苦、甜味	10.80	6.38	6.17	5.67	5.57	6.13	7.70
Arg	苦味	0.12	/	0.00	/	0.00	2.45	0.28
Pro	无味	0.22	0.18	0.17	0.17	0.14	0.02	0.14

## 2.6 电子鼻分析

酱卤草鱼经过电子鼻的检测后进行雷达图分析和主成分分析,如图5所示。图5A显示了电子鼻

的10个传感器对不同卤制条件下的草鱼块的响应值大小,W1W和W2W的响应值存在差异,其他的传感器响应值均较低,说明无机硫化物(W1W)、芳

香成分与有机硫化物(W2W)传感器在酱卤草鱼的总体香气评价中起主要作用。卤制条件为4℃-8 h和95℃-2 h的酱卤草鱼在W1W以及W2W传感器上的响应值分别为最大值和最小值,说明这两种卤制温度下草鱼肉的总体香气差异较大。此外,随着卤制温度升高,W1W和W2W的响应值降低。

PCA分析如图5B所示,PC1、PC2的贡献率分别为54.6%、26.3%,其总贡献率为80.9%,高于80%,表明PC1和PC2可以反应不同卤制条件下的酱卤草鱼挥发性风味物质的主要信息特征。与对照(Bla)组相比,不同的温度和时间处理组之间稍有重叠,且对草鱼卤煮风味的产生均有较大的影响。尤其是4℃-8 h和65℃-4 h卤制条件组与Bla组间距离最远,说明在这两种卤制条件下的酱卤草鱼香气有较大的变化。温度升高可以促进小分子的运动和水分的快速渗透,时间的延长导致鱼肉可以容纳更多的挥发性物质和非挥发性物质,并产生明显差异。不同卤制条件对草鱼的电子鼻传感器敏感度不同,产生的最终结果也不同。因此,在电子鼻分析草鱼肉总体香气的基础上,进一步采用GC-IMS对其挥发性风味成分的种类进行鉴定分析。

## 2.7 HS-GC-IMS 分析

**2.7.1 不同条件的酱卤草鱼的 VOCs** 为了更明显比较不同卤制条件之间的风味差异,以Bla为对照,采用差异谱图(图6)来直观对比样品中所有挥发性物质在不同样品中的差异。图中红色表示其他几组样品的某一种挥发性风味物质高于参照组,颜色越深,含量越高,蓝色表示对应风味物质低于参照组。在25℃-6 h、25℃-8 h和4℃-8 h的对比图显示红

色点变少,说明25℃以下,不利于食品风味的产生,如美拉德反应、脂质氧化以及蛋白质降解<sup>[34]</sup>。

**2.7.2 挥发性风味物质的定性分析** 不同的卤制条件的酱卤草鱼中共检测出56种挥发性化合物,其中鉴定出13种单体以及部分二聚体和4种未定性的挥发性化合物,包括7种醇、4种醛、4种酮、5种酯、1种酸、4种烷烃、2种含氮化合物和7种其他类物质。各种物质的相对含量(%)变化如图7A所示,碳氢类化合物和醛类在卤制阶段增加,而醇类物质的相对含量(%)稍有降低。

如图7B指纹图谱所示,揭示了酱卤草鱼在不同卤制条件下的挥发性风味成分的动态变化。从图中可以看出,草鱼肉经过卤制后的风味变化明显。a区域是腌制鱼干特有的风味成分;b区域是酱卤草鱼特有的风味,且不随卤制条件的变化而变化;c区域则是65℃时出现的挥发性风味成分。说明卤制改变了腌制草鱼的风味,并且在65℃的卤制条件下,出现了新的特征性 VOCs。

醇类化合物主要来源是脂肪酸的氧化降解,可赋予水产品清香气味,是食品中重要的挥发性风味物质<sup>[35]</sup>。如图7B所示,检测到的醇类物质分别是戊醇、正丁醇、丙醇、丁醇、2-甲基丁醇和3-甲基丁醇,其中对酱卤草鱼的风味起主要作用的是2-甲基-1-丁醇、2-丁醇和1-戊醇。

醛类化合物一般由脂肪酸氧化降解或者氨基酸Strecker降解产生,具有较低的阈值和特殊的风味<sup>[36]</sup>,因此对酱卤草鱼的整体风味具有重要作用。本研究中共检测出4种醛类,分别是己醛、丙醛、丁醛和3-甲基丁醛。其中丙醛和己醛是卤制阶段的特征风味物质,而丁醛和3-甲基丁醛是对照组和卤制组

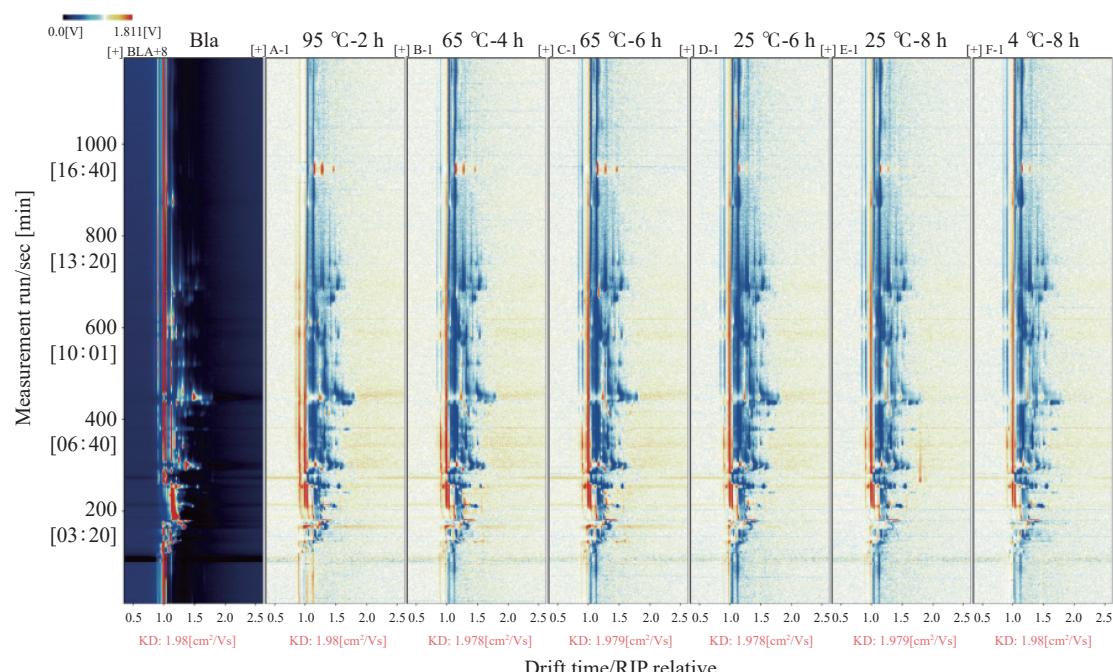


图6 不同卤制条件的草鱼挥发性物质对比差异图

Fig.6 Comparison and difference of volatile compounds of marinated grass carp

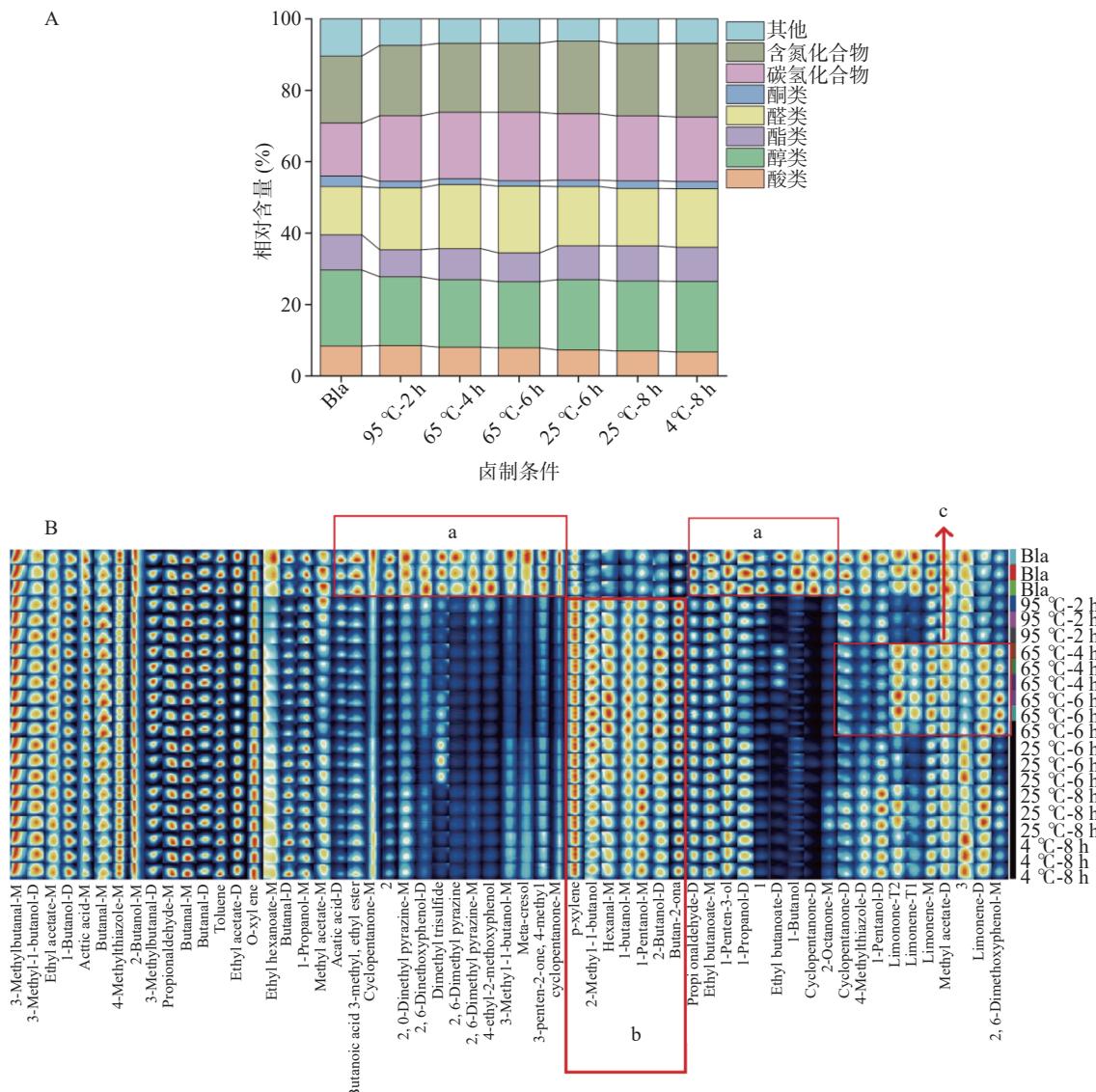


图 7 酱卤草鱼 GC-IMS 的挥发性风味化合物组成(A)和挥发性风味物质指纹图谱(B)

Fig.7 Composition of volatile flavor compounds in GC-IMS of marinated grass carp (A) and the VOCs fingerprints of volatile flavor compounds of marinated grass carp (B)

共有的挥发性风味物质,其中3-甲基丁醛是干腌鱼类的主要挥发性成分之一,由亮氨酸的分解或者蛋白质的氧化产生,与Zhang等<sup>[37]</sup>研究结果类似。

酮类化合物由不饱和脂肪酸氧化、脱羧反应和仲醇脱氢产生<sup>[38]</sup>,部分来源于香辛料,对食品的风味非常重要。本研究共检测出4种酮类化合物,分别是环戊酮、2-辛酮、2-丁酮和4-甲基-3-戊烯-2-酮。与对照组相比,卤制会导致鱼肉中酮类物质的种类减少,并产生2-丁酮具有辛辣甜味。

酯类化合物主要是脂肪酸氧化的产物,其阈值较高,对风味起调节作用。本研究检测到的酯类化合物分别是乙酸甲酯、丁酸乙酯、三硫醚二甲酯、丁酸-3-甲基乙酯、乙酸乙酯和己酸乙酯。其中三硫醚二甲酯、丁酸-3-甲基乙酯仅出现在干腌草鱼中即对照组中,可能是卤制过程使得酯类物质水解成酸类和醇类,与卤制过程中醇类物质增加结果一致。其它类化合物如烷烃类具有花果香、辛香等,其中柠檬烯是

65 °C条件下产生的特征风味化合物。对照组中检测出2,6-二甲基吡嗪,这类物质散发出烘培的食品味道,使鱼干香味更浓郁,黄晓岚等<sup>[39]</sup>研究发现这类物质对虾黄香味具有重要的贡献。

**2.7.3 偏最小二乘判别(OPLS-DA)分析** OPLS-DA是一种有监督判别模式的统计方法,可以有效解释观测值并进行相应变量的预测,通过 $R^2$ 和 $Q^2$ 对模型的可靠性和预测能力进行评估, $R^2$ 为模型的拟合能力, $Q^2$ 表示模型的预测能力,其值大于0.5表示模型拟合度可接受,越接近1表示预测能力越强<sup>[40]</sup>。如图8A所示,以挥发性风味成分为x变量,以不同卤制条件的酱卤草鱼肉为Y变量,建立OPLS-DA相关模型,判别效果 $R^2=0.994$ , $Q^2=0.973$ ,说明该模型预测能力较好。如图8B所示,对该模型进行200次置换检验,其Q回归线与横坐标交叉,且截距为负数,该模型没有发生过拟合,说明其预测能力较好,可描述不同条件的酱卤草鱼的VOCs具有

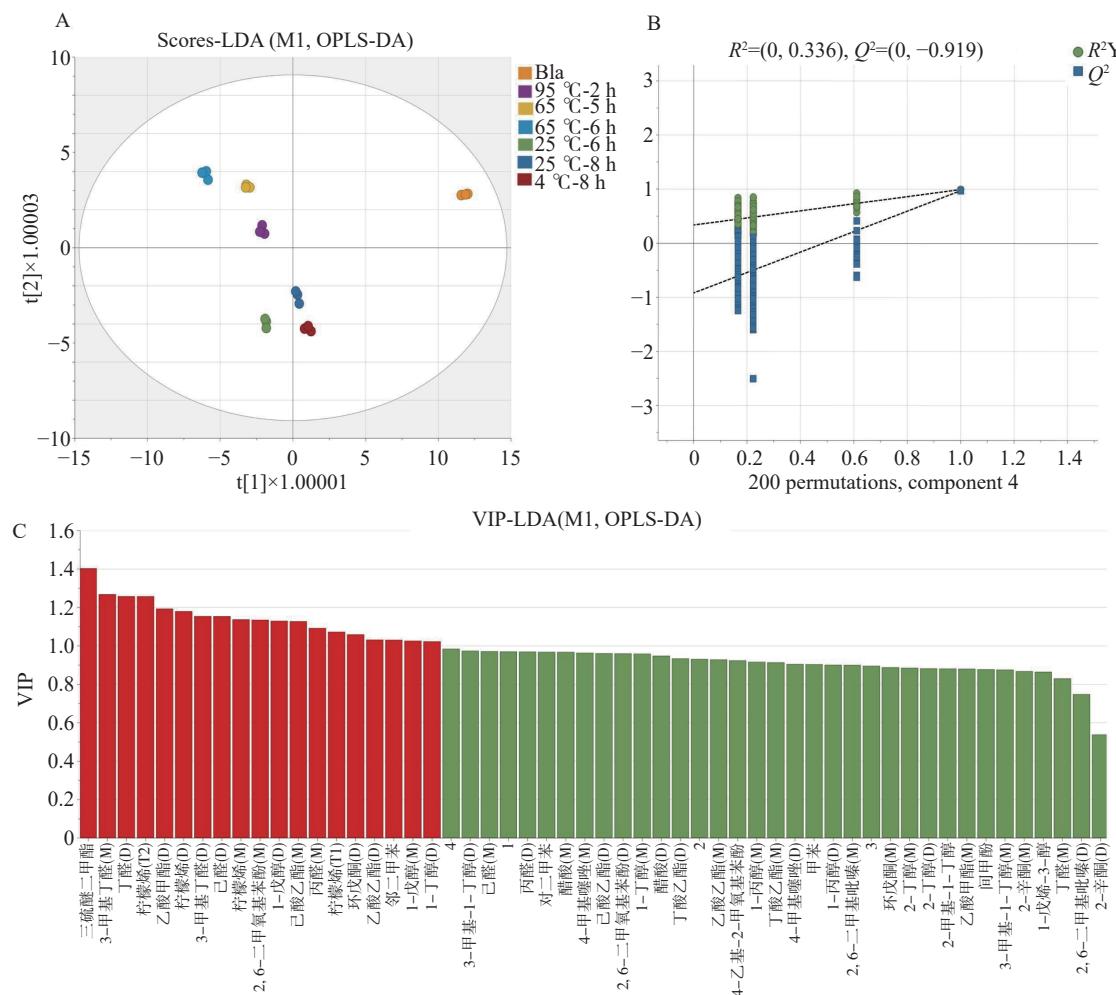


图 8 OPLS-DA 得分图(A)、置换检验图(B)以及基于 OPLS-DA 模型分析的变量投影重要性值(C)

Fig.8 OPLS-DA score (A), displacement test (B) and VIP value based on OPLS-DA model analysis (C)

差异。

变量投影重要性(Variable Importance in Projection, VIP)可量化每个变量对酱卤草鱼风味的贡献, 其值越大说明不同卤制条件下的 VOCs 差异越显著, 一般选取 VIP>1 的 VOCs 作为不同卤制条件的酱卤草鱼关键挥发性风味成分<sup>[41]</sup>。如图 8C 所示, 共筛选出 19 种关键挥发性风味成分, 包括三硫醚二甲酯、3-甲基丁醛、己醛、1-戊醇等; 其中, 已有研究表明己醛是脂质氧化的主要标志物, 阈值低且具有青草味和脂肪味, 在 65 °C-6 h 的卤制条件下其含量较高, 说明该条件有利于脂肪酸氧化产生己醛, 并促进良好风味的产生。

2.7.4 不同卤制条件的 ROAV 值 ROAV 法被广泛用于关键风味化合物分析, ROAV 值越接近 100 说明对酱卤草鱼的贡献率越大, ROAV≥1 的化合物为关键性风味化合物, 而 0.1<ROAV<1 的化合物被认为对酱卤草鱼的风味起修饰作用<sup>[42]</sup>。3-甲基丁醛的阈值低(1.1 μg/kg)且相对含量较高, 因此作为酱卤鱼的关键风味物质, ROAV<sub>stan</sub> 为 100。由表 3 可知关键风味化合物有 2-甲基-1-丁醇、3-甲基-1-丁醇、3-甲基丁醛、丙醛、丁醛、丁酸乙酯、己醛、己酸乙酯、甲苯、柠檬烯、乙酸甲酯、乙酸乙酯等 13 种关键性化合物, 对酱卤草鱼的风味调节起关键作用。此外, 15 种风味化合物被认为是具有修饰作用的风味

表 3 不同卤制条件下草鱼肉的风味物质的阈值和 ROAV

Table 3 Threshold and ROAV of flavour substances in grass carp meat under different brining conditions

化合物名称	气味描述 <sup>[43-44]</sup>	阈值(μg/kg) <sup>[45]</sup>	ROAV							
			Bla	95 °C-2 h	65 °C-4 h	65 °C-6 h	25 °C-6 h	25 °C-8 h	4 °C-8 h	
醋酸	酸味、水果、辛辣	22000	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
1-丙醇	酒精、糖果	240	0.31	0.22	0.19	0.18	0.26	0.24	0.27	
1-丁醇	芳香、愉快	459.2	0.41	0.24	0.23	0.22	0.29	0.27	0.28	
1-戊醇	蘑菇、泥土、青草	150.3	0.10	0.12	0.12	0.12	0.14	0.15	0.14	
1-戊烯-3-醇	塑料、刺激性、焦味、肉味	358.1	0.13	0.09	0.08	0.08	0.10	0.09	0.11	
2,6-二甲基吡嗪	烘培、可可、咖啡、青草	718	0.06	0.03	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	

续表3

化合物名称	气味描述 <sup>[43-44]</sup>	阈值(μg/kg) <sup>[45]</sup>	ROAV						
			Bla	95 ℃-2 h	65 ℃-4 h	65 ℃-6 h	25 ℃-6 h	25 ℃-8 h	4 ℃-8 h
2,6-二甲氧基苯酚	/	1850	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	0.02	0.02
2-丁醇	酒精味	3300	0.05	0.04	0.04	0.04	0.05	0.04	0.05
2-甲基-1-丁醇	发酵、榛子	16	1.22	2.23	2.21	2.44	2.54	2.15	2.15
2-辛酮	肥皂、花香	50.2	0.47	0.19	0.17	0.16	0.18	0.30	0.23
3-甲基-1-丁醇	青草香、花香	4	45.24	30.18	27.63	25.79	35.50	35.52	39.99
3-甲基丁醛	辛辣、杏仁、坚果味	1.1	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
4-甲基噻唑	/	55	10.34	9.24	8.76	8.71	10.83	10.27	11.15
4-乙基-2-甲氧基苯酚	烟熏、花香、辛辣	89.3	0.29	0.11	0.07	0.05	0.07	0.07	0.07
丙醛	花香味、辛辣味	15.1	5.02	3.77	3.84	3.71	4.71	4.14	4.78
丁醛	辛辣味、青草味	8.2	28.42	33.50	32.40	33.57	34.78	32.28	35.19
丁酸乙酯	甜香、果香	1	68.02	46.41	45.64	38.53	53.21	50.70	54.85
对二甲苯	/	1000	0.19	0.25	0.23	0.24	0.27	0.25	0.26
环戊酮	杂醇味	51100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
己醛	大蒜、青草味、辛辣味、油脂味、腥味	5	4.10	4.88	5.23	6.44	5.98	4.70	5.73
己酸乙酯	果味、草莓	2.3	32.97	22.86	25.98	25.90	29.89	31.88	32.86
甲苯	甜香、刺激性	52.7	2.19	1.74	1.59	1.62	1.96	1.83	1.97
间甲酚	/		/	/	/	/	/	/	/
邻二甲苯	油脂味、刺激性	450.2	0.23	0.23	0.20	0.20	0.27	0.24	0.26
柠檬烯	柑橘类甜香	10	7.06	4.99	6.74	7.20	6.07	6.73	6.67
三硫醚二甲酯	/		/	/	/	/	/	/	/
乙酸甲酯	/	2	11.88	9.12	8.21	7.86	10.16	10.17	10.51
乙酸乙酯	果味、黄油味	5	27.53	15.67	18.97	16.07	24.99	26.58	27.12

化合物,具有水果味、酒味以及芳香味等,辅助酱卤草鱼良好风味的形成。

### 3 结论

本研究探究了不同卤制时间和温度对草鱼肉卤制过程中品质和风味形成的影响。当卤制条件为95 ℃-2 h 和 65 ℃-6 h 时,草鱼的感官评分和可接受度最高。理化性质结果显示卤制会显著( $P<0.05$ )增加鱼肉的水分含量并降低TVB-N含量,尤其在65 ℃-6 h 条件下。蛋白质含量结果显示,其在卤制过程中发生降解,导致营养流失;但是相对于其他卤制条件,65 ℃-6 h 的卤制条件的蛋白质含量较高。此外,不同的卤制温度和时间对酱卤草鱼的TBARS值影响不同,当卤制时间为8 h时,草鱼肉的TBARS含量较高,甚至高于未卤制组,而95 ℃-2 h 和 65 ℃-6 h 组具有更低的TBARS值。氨基酸结果显示卤制改变了草鱼的氨基酸的组成和含量。电子鼻的PCA分析显示未卤制组与卤制组能区分开。GC-IMS结果显示,共筛选到56种挥发性化合物,根据VIP和ROAV值进一步筛选出19种和13种关键性 VOCs,这些关键性 VOCs 共同作用导致了不同卤制条件的酱卤草鱼风味变化差异。总之,随着卤制时间和温度的改变,酱卤鱼的感官和理化性质均有显著差异( $P<0.05$ ),尤其是65 ℃-6 h 的条件,酱卤鱼的品质和风味均较好,过高和过低的温度以及过长时间的卤制均会降低其食用品质。

© The Author(s) 2025. 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] 方心如,肖乃勇,郭全友,等.基于顶空-气相色谱-离子迁移谱分析蒸制过程中草鱼肉挥发性成分的变化[J].食品与发酵工业,2023,49: 241-250. [FANG X R, XIAO N Y, GUO Q Y, et al. Identification of changes in volatile compounds in grass carp during steaming by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49: 241-250.]
- [2] QIN J Y, WANG Z H, WANG X C, 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.
- [3] 魏瑶,邓力,李静鹏,等.酱卤猪肉煮制过程中品质变化动力学研究[J].食品与发酵科技,2021,57: 77-83, 102. [WEI Y, DENG L, LI J P, et al. Study on the dynamics of quality changes in the process of sauce and braised pork cooking[J]. Food and Fermentation Science & Technology, 2021, 57: 77-83, 102.]
- [4] FARNETI B, ALARCÓN A A, PAPASOTIRIOU F G, et al. Chilling-induced changes in aroma volatile profiles in tomato[J]. Food and Bioprocess Technology, 2015, 8(7): 1442-1454.
- [5] CAI J J, ZHU Y Y, MA R H, et al. Effects of roasting level on physicochemical, sensory, and volatile profiles of soybeans using electronic nose and HS-SPME-GC-MS[J]. Food Chemistry, 2021, 340: 127880.
- [6] 顾赛麒,周洪鑫,郑皓铭,等.干制方式对腌腊草鱼脂肪氧化和挥发性风味成分的影响[J].食品科学,2018,39(21): 1-10. [GU S Q, ZHOU H X, ZHENG H M, et al. Effects of different dry-

- ing methods on lipid oxidation and volatile flavor components of cured grass carp[J]. Food Science, 2018, 39(21): 1–10. ]
- [ 7 ] TAO W J, WANG S Y, JIANG W. Effects of ultra-high pressure treatment on aroma components of braised mandarin fish[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 565 (1): 012063.
- [ 8 ] 李佳敏, 王修俊, 杨丽平, 等. 三穗特色卤香鸭卤制过程中品质变化及其影响因素模型构建[J]. 中国食品学报, 2023, 23: 147–160. [ LI J M, WANG X J, YANG L P, et al. Quality changes and construction of influencing factors model for three spike characteristic stewed duck during stewing[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23: 147–160. ]
- [ 9 ] YAO H, XU Y L, LIU W, et al. Taste compounds generation and variation of broth in pork meat braised processing by chemical analysis and an electronic tongue system[J]. Journal of Food Biochemistry, 2021, 46(6): e13766.
- [ 10 ] 万娟, 张慾, 王拥军, 等. 草鱼咸干的脱盐与卤鱼加工风味的研究[J]. 食品与生物技术学报, 2012, 31(5): 525–530. [ WAN J, ZHANG M, WANG Y J, et al. Study on the desalination of dried grass carp and the flavor research of marinated fish[J]. Journal of Food Science and Biotechnology, 2012, 31(5): 525–530. ]
- [ 11 ] CAVANNA D, ZANARDI S, DALL'ASTA C, et al. Ion mobility spectrometry coupled to gas chromatography: A rapid tool to assess eggs freshness[J]. Food Chemistry, 2019, 271: 691–696.
- [ 12 ] ZHENG Z H, TIAN M, LIAO G Z, et al. Evaluation of the effects of compound curing agents on the lipid profiles and volatile flavors in Nuodeng ham based on lipidomics and GC-IMS analysis [J]. Food Research International, 2024, 176: 113810.
- [ 13 ] WAN J W, LIU Q, MA C Z, et al. Characteristic flavor fingerprint disclosure of dzo beef in Tibet by applying SAFE-GC-O-MS and HS-GC-IMS technology[J]. Food Research International, 2023, 166: 112581.
- [ 14 ] WEN R X, KONG B H, YIN X Y, et al. Characterisation of flavour profile of beef jerky inoculated with different autochthonous lactic acid bacteria using electronic nose and gas chromatography-ion mobility spectrometry[J]. Meat Science, 2022, 183: 108658.
- [ 15 ] SUN X, YU Y M, WANG Z Y, et al. Insights into flavor formation of braised chicken: Based on E-nose, GC-MS, GC-IMS, and UPLC-Q-Exactive-MS/MS[J]. Food Chemistry, 2024, 448: 138972.
- [ 16 ] 赵玲, 王琳, 曹荣, 等. 基于 SPME-GC-MS 和电子舌分析不同处理秋刀鱼烤后的风味特征[J/OL]. 食品科学, 2023: 1–9(2023-10-11)[2024-06-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20231010.1057.066.html>. [ ZHAO L, WANG L, CAO R, et al. Analysis of flavor characteristic of differently treated Cololabis saira after roasting based on solid-phase micro-extraction gas chromatography-mass spectrometry and electronic tongue[J/OL]. Food Science, 2023: 1–9(2023-10-11)[2024-06-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2206.TS.20231010.1057.066.html>. ]
- [ 17 ] ALI GHOLGAR GHASEMI M, HAMISHEHKAR H, JAVADI A, et al. Natural-based edible nanocomposite coating for beef meat packaging[J]. Food Chemistry, 2024, 435: 137582.
- [ 18 ] LAN T, GAO C X, YUAN Q Y, et al. Analysis of the aroma chemical composition of commonly planted kiwifruit cultivars in China[J]. Foods, 2021, 10(7): 1645.
- [ 19 ] WU W Y, WANG X Y, HU P, et al. Research on flavor characteristics of beef cooked in tomato sour soup by gas chromatography-ion mobility spectrometry and electronic nose[J]. LWT, 2023, 179: 114646.
- [ 20 ] WANG Y, TIAN X J, LIU X Z, et al. Focusing on intramuscular connective tissue: Effect of cooking time and temperature on physical, textual, and structural properties of yak meat[J]. Meat Science, 2022, 184: 108690.
- [ 21 ] 王子凌, 张子豪, 曾璐瑶, 等. 不同卤制加工阶段中食盐添加量对小龙虾尾品质及挥发性风味的影响[J]. 食品科学, 2024, 45(11): 52–60. [ WANG Z L, ZHANG Z H, ZENG L Y, et al. Effect of salt addition at different processing stages on the quality and volatile flavoromponents of marinated crayfish tails[J]. Food Science, 2024, 45(11): 52–60. ]
- [ 22 ] YUAN H, XU L Y, CHANG M C, et al. Effects of different cooking methods on volatile flavor compounds, nutritional constituents, and antioxidant activities of *Clitocybe squamulosa*[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 1017014.
- [ 23 ] 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: 70–77. [ XIA Y T, WU W L, ZHANG W, et al. Effect of salt addition at different processing stages on the quality and volatile flavoromponents of marinated crayfish tails[J]. Food Science, 2023, 44: 70–77. ]
- [ 24 ] 高瑞昌, 袁丽, 刘伟民, 等. 热泵冷风干燥鲢鱼的挥发性盐基氮和脂质氧化品质模型[J]. 农业工程学报, 2013, 29: 227–232.
- [ 25 ] 章佳佳, 陈雪, 刘欢, 等. 半干鲐鱼片冷风干燥工艺优化及货架期预测[J]. 食品工业科技, 2018, 39: 285–292. [ ZHANG J J, CHEN X, LIU H, et al. Optimization of the cold air drying conditions and prediction on shelf-life of half-dried *Scomberjaponicus* fillets[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39: 285–292. ]
- [ 26 ] GAO L L, ZHANG L H, LIU J, et al. Analysis of the volatile flavor compounds of pomegranate seeds at different processing temperatures by GC-IMS[J]. Molecules, 2023, 28(6): 2717.
- [ 27 ] CONTINI C, ÁLVAREZ R, O'SULLIVAN M, et al. Effect of an active packaging with citrus extract on lipid oxidation and sensory quality of cooked turkey meat[J]. Meat Science, 2014, 96(3): 1171–1176.
- [ 28 ] ZHUANG S, HONG H, ZHANG L T, et al. Spoilage-related microbiota in fish and crustaceans during storage: Research progress and future trends[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(1): 252–288.
- [ 29 ] JIN G F, ZHANG J H, YU X, et al. Crude lipoxygenase from pig muscle: Partial characterization and interactions of temperature, NaCl and pH on its activity[J]. Meat Science, 2011, 87(3): 257–263.
- [ 30 ] CHEN Q M, XIE Y F, XI J Z, et al. Characterization of lipid oxidation process of beef during repeated freeze-thaw by electron spin resonance technology and Raman spectroscopy[J]. Food Chemistry, 2018, 243: 58–64.
- [ 31 ] 杨要芳, 王治军, 宋春勇, 等. 热风干制对牡蛎特征风味的影响[J/OL]. 食品与发酵工业, 2024: 1–14(2024-06-13)[2024-06-20]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.1-1802.ts.039653>. [ YANG Y F, WANG Z J, SONG C Y, et al. Effect of hot air drying on the characteristic flavor of oysters[J/OL]. Food and Fermentation Industries, 2024: 1–14 (2024-06-13) [2024-06-20]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802.ts.039653>. ]
- [ 32 ] 彭婷婷, 张春江, 黄峰, 等. 卤制液循环使用对扒鸡腿非挥发性和挥发性风味成分变化规律的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(11): 255–266. [ PENG T T, ZHANG C J, HUANG F, et al. Changes of non-volatile and volatile flavor compounds in braised

- chicken legs during the reuse of marinating liquid[J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(11): 255–266. ]
- [ 33 ] 郭慧, 张宝雪, 孔玲, 等. 超声波辅助定量卤制对茶香味卤煮牛肉品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 107–115. ]
- [ GUO H, ZHANG B X, KONG L, et al. Effect of ultrasonic-assisted quantitative cooking on the quality of tea-flavored stewed beef[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 107–115. ]
- [ 34 ] RAMALINGAM V, SONG Z, HWANG I. The potential role of secondary metabolites in modulating the flavor and taste of the meat[J]. Food Research International, 2019, 122: 174–182.
- [ 35 ] 廖林, 刘悦, 贺稚非, 等. 基于顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱技术的卤烤兔肉丁加工过程中挥发性风味物质变化分析 [J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(14): 235–243. [ LIAO L, LIU Y, HE Z F, et al. Analysis of volatile flavor substances during processing of halogen roast rabbit meat basedon headspace solid-phase microextraction combined with gas chromatography-massspectrometry [J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(14): 235–243. ]
- [ 36 ] 周唯伊, 陆欣怡, 戴嘉宁, 等. 超声波辅助卤制雪山鸡的品质和风味分析 [J]. 肉类研究, 2021, 35: 33–40. [ ZHOU W Y, LU X Y, DAI J N, et al. Effects of ultrasonic-assisted stewing on the quality and flavor of marinated Xueshan chicken[J]. Meat Research, 2021, 35: 33–40. ]
- [ 37 ] ZHANG Q, DING Y C, GU S, et al. Identification of changes in volatile compounds in dry-cured fish during storage using HS-GC-IMS[J]. Food Research International, 2020, 137: 109339.
- [ 38 ] ZHUANG K J, WU N, WANG X C, et al. Effects of 3 feeding modes on the volatile and nonvolatile compounds in the edible tissues of female Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. Journal of Food Science, 2016, 81(4): S968–81.
- [ 39 ] 黄晓嵐, 雷佳佳, 黄万一, 等. 不同热加工方式对小龙虾黄理化特性、挥发性风味物质和感官品质的影响 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(15): 126–136. [ HUANG X L, LEI J J, HUANG W Y, et al. Effects of different thermal processing methods on the physicochemical properties, volatile flavor substances and sensory quality of crayfish hepatopancreas[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(15): 126–136. ]
- [ 40 ] 赵丽丽, 王继红, 卢晨曦, 等. 气相色谱-离子迁移谱结合多元统计学分析不同包装对香椿粉品质的影响 [J]. 食品科学, 2024, 45(7): 252–262. [ ZHAO L L, WANG J H, LU C X, et al. Effect of different packaging materials on the quality of *Toona sinensis* powder analyzed by gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with multivariate statistical analysis[J], Food Science, 2024, 45(7): 252–262. ]
- [ 41 ] 韩乃瑄, 马成莹, 李敏, 等. 电子鼻和 GC-IMS 联用分析不同条件发酵山楂糯米酒的香气成分 [J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(23): 312–320. [ HAN N X, MA C Y, LI M, et al. Analysis of aroma components of hawthorn glutinous rice wine fermented under different conditions using an electronic nose and GC-IMS[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(23): 312–320 ]
- [ 42 ] YAO L, MO Y, CHEN D, et al. Characterization of key aroma compounds in Xinjiang dried figs (*Ficus carica* L.) by GC-MS, GC-olfactometry, odor activity values, and sensory analyses[J]. LWT, 2021, 150: 111982.
- [ 43 ] 何文佳, 王敏, 张任虎, 等. 毛坯腌制速率对腐乳风味及其质构特性影响 [J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(21): 136–143. [ HE W J, WANG M, ZHANG R H, et al. Effect of pehtze salting rate on flavor and texture properties of sufu[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(21): 136–143. ]
- [ 44 ] MU H, WEI Z H, YI L N, et al. Dietary fishmeal levels affect the volatile compounds in cooked muscle of farmed large yellow croaker *Larimichthys crocea*[J]. Aquaculture Research, 2017, 48(12): 5821–5834.
- [ 45 ] GIRI A, OSAKO K, OHSHIMA T. Effects of hypobaric and temperature-dependent storage on headspace aroma-active volatiles in common squid miso[J]. Food Research International, 2011, 44 (3): 739–747.