

基于气相色谱-离子迁移谱和电子舌技术分析鱿鱼须烤制过程中风味轮廓变化

许丹, 陈云, 沈虹力, 范霞, 张小军, 邓尚贵

Analysis the Changes of Flavor Profile of Squid Tentacles during the Baking Process Based on Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy and Electronic Tongue

XU Dan, CHEN Yunyun, SHEN Hongli, FAN Xia, ZHANG Xiaojun, and DENG Shanggui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024060422>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于气相色谱-离子迁移谱和电子鼻技术分析制坯方式对三华李果坯挥发性成分的影响

Effects of Billet-Making Methods on Volatile Flavor Components of Sanhua Plum Fruit Billets Based on Headspace-Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy and Electronic Nose

食品工业科技. 2023, 44(23): 253-261 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023010024>

电子鼻结合气相-离子迁移谱联用技术分析兰茂牛肝菌气调贮藏期间挥发性风味物质的变化

Changes in Volatile Compounds of *Lanmaoa asiatica* during Controlled Atmosphere Storage Using Electronic Nose Combined with Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy

食品工业科技. 2021, 42(21): 111-117 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021070297>

电子鼻和气相离子迁移谱技术比较瓮臭味及正常红酸汤的风味差异

Analysis on the Flavor Difference of Red Sour Soup Including Urn Odor and Normal Flavor Samples with Electronic Nose and Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy

食品工业科技. 2020, 41(14): 216-221,227 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.14.035>

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>

基于气相色谱-离子迁移谱技术分析不同包装条件对黄瓜风味的影响

Analysis of the Effect of Different Packaging Conditions on Cucumber Flavor Based on Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry Technology

食品工业科技. 2022, 43(8): 296-304 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021080221>

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>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

许丹, 陈云云, 沈虹力, 等. 基于气相色谱-离子迁移谱和电子舌技术分析鱿鱼须烤制过程中风味轮廓变化 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(11): 273-280. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060422

XU Dan, CHEN Yunyun, SHEN Hongli, et al. Analysis the Changes of Flavor Profile of Squid Tentacles during the Baking Process Based on Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy and Electronic Tongue[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(11): 273-280. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060422

· 分析检测 ·

基于气相色谱-离子迁移谱和电子舌技术分析 鱿鱼须烤制过程中风味轮廓变化

许丹¹, 陈云云², 沈虹力², 范霞³, 张小军^{1,4,*}, 邓尚贵⁴

(1.浙江省海洋水产研究所, 浙江舟山 316021;

2.中国水产舟山海洋渔业有限公司, 浙江舟山 316000;

3.南京农业大学, 江苏南京 210095;

4.浙江海洋大学食品与医药学院, 浙江舟山 316022)

摘要:采用气相色谱-离子迁移谱技术和电子舌技术分析鱿鱼须烤制过程中风味物质差异和变化, 旨在研究鱿鱼须烤制过程中风味轮廓变化。结果表明: 随着烤制时间的延长, 鱿鱼须游离氨基酸的组成变化不大, 主要影响游离氨基酸的含量, 进而影响鱿鱼须的品质和风味; 鱿鱼须烤制过程中滋味存在明显差异, 酸味基本保持不变, 鲜味、咸味和鲜味丰富度呈现增强趋势, 无明显苦涩味; 在五种不同烘烤时间的样品中, 检测到 29 种风味物质, 包括 14 种醛类、3 种酮类、5 种醇类、3 种酯类、2 种酸类和 2 种烯烃类。其中, 醛类物质在鱿鱼触须的整体风味中占主导地位, 并随着烘烤时间的延长呈现增加趋势, 这与酯类物质的趋势一致, 但酸类物质含量呈现相反趋势, 酮类和醇类物质含量呈现先降后增的趋势, 烯烃类含量较少且对风味贡献较小。烤制过程中鱿鱼须的风味物质发生了显著变化, 这些变化有助于理解鱿鱼须烤制过程中风味轮廓的变化, 并为优化鱿鱼须烤制工艺和提升产品品质提供了科学依据。

关键词:气相色谱-离子迁移谱, 电子舌, 鱿鱼须, 风味轮廓

中图分类号: TS254.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)11-0273-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060422



本文网刊:

Analysis the Changes of Flavor Profile of Squid Tentacles during the Baking Process Based on Gas Chromatography-Ion Mobility Spectroscopy and Electronic Tongue

XU Dan¹, CHEN Yunyun², SHEN Hongli², FAN Xia³, ZHANG Xiaojun^{1,4,*}, DENG Shanggui⁴

(1.Zhejiang Marine Fisheries Research Institute, Zhoushan 316021, China;

2.China Aquatic Products Zhoushan Marine Fisheries Corporation, Zhoushan 316000, China;

3.Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;

4.College of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: Gas chromatography-ion mobility spectroscopy and electronic tongue technology were used to analyze the differences and changes of flavor substances in the baking of squid tentacles, in order to study the changes of flavor profile in the baking of squid tentacles. The results showed that with the extension of baking time, the composition of free amino acids in squid tentacles changed little, which mainly affected the content of free amino acids, and then affected the quality and flavor of squid tentacles. There were obvious differences in the taste of squid tentacles during the baking process. The

收稿日期: 2024-06-28

基金项目: 舟山市重大产业攻关项目 (2023C03006) - 大宗水产品预制菜肴加工关键技术研发与产业化示范。

作者简介: 许丹 (1991-), 女, 硕士, 工程师, 研究方向: 水产品加工与质量安全研究, E-mail: xdplmm@126.com。

* 通信作者: 张小军 (1982-), 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向: 水产品加工与质量安全研究, E-mail: xiaojun3627@163.com。

sour taste remained basically unchanged, and the umami, saltiness and umami richness showed an enhanced trend, without obvious bitterness and astringency. In the samples with five different baking times, 29 flavor compounds were detected, including 14 aldehydes, 3 ketones, 5 alcohols, 3 esters, 2 acids, and 2 olefins. Among them, aldehydes played a dominant role in the overall flavor of squid tentacles and showed an increasing trend with the extension of baking time, which was consistent with the trend of esters. However, the content of acid substances showed an opposite trend, and the content of ketone and alcohol substances first decreased and then increased. Less olefin content contributed less to the flavor. The flavor substances of the squid tentacles changed significantly during the roasting process, which could help to understand the changes of the flavor contour during the roasting process, and provided a scientific basis for optimizing the squid whiskers roasting process and improved the product quality.

Key words: gas chromatography-ion mobility spectroscopy; electronic tongue; squid tentacles; flavor profile

烤制是中式菜肴特有且应用最广的传统烹饪方式,将原辅料和调味料在高温短时条件下烹饪而成^[1-2]。由于温度高于蒸、煮、酱卤等加工方式,且可以在短时间产生较高热量,有助于产品形成鲜香风味和焦嫩的口感,是特征风味形成的关键,因而备受大众喜爱^[1,3]。高温烤制过程中发生脂质氧化、热降解和美拉德反应,这些复杂反应产生大量对风味起作用的呈味物质,有利于促进挥发性风味物质的形成和释放^[4]。烤制等烹饪方式虽能够有效杀灭病原微生物,提高食物食用安全性,有效释放呈味物质,改善食物风味,但是过度烤制会降低食物营养价值^[5]。

产品品质涉及到滋味、气味、营养、口感等多个方面,无法通过一种仪器进行全面综合分析。智能感官分析技术使用现代精密仪器来模拟人体的感觉器官,常用的包括计算机视觉、电子鼻、电子舌和气相-离子迁移色谱等分析技术,可以获得大量描述产品风味轮廓特征和滋味成分信息。其中,气相-离子迁移色谱(Gas chromatography-ion mobility spectroscopy, GC-IMS)具有操作简单、灵敏度高、能保留样品原味等优点,可广泛用于各种食品的保质期、挥发性风味成分、产地鉴定、质量检测分析等^[6-7]。多元化的分析技术具有检测时间短、无感官疲劳、信息量高、容错性好等优点^[8]。研究表明,鱼的挥发性气味变化可借助电子鼻等技术准确检测,从而研究出适合该菜肴的加工方法以及挥发性成分信息变化^[9];质谱仪可以通过检测海鲈鱼肉质地(硬度、弹性等)来选择最佳烹饪方式^[10];范思华^[11]运用感官评价和电子舌相结合技术对细点圆趾蟹汁的滋味进行分析后确定了鲜味最强的组分;许丹等^[8]通过电子舌、质谱仪等多元智能感官分析技术结合传统感官评价了细点圆趾蟹蟹肉制品品质特性;陈丽兰等^[12]通过GC-IMS结合化学计量法分析了郫县豆瓣酱挥发性化合物在烤制过程中的变化;徐永霞等^[13]运用GC-IMS技术分析海鲈鱼蒸制过程中风味物质的变化;刘胜男等^[14]运用电子鼻和GC-IMS技术分析了玉筋鱼干中68种挥发性成分,且明确了特定组分在玉筋鱼干风味形成中的作用。

针对鱿鱼须风味的分析,鉴于烤制作为中式菜肴中特有且广泛运用的传统烹饪技术,对于产品特征风味的形成具有至关重要的作用。通过分析鱿鱼须

烤制过程中的风味变化,可以深入了解其呈味物质的产生和释放机制,为优化烹饪工艺、提升产品品质提供科学依据。而烤制过程中风味轮廓动态变化是一个新的研究方向,本实验分析不同烤制时间下鱿鱼须风味轮廓变化,旨在为改善鱿鱼须加工过程中风味轮廓提供一定理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

冷冻生鱿鱼须(不添加任何佐料) 中国水产舟山海洋渔业有限公司。

MG38CB-AA 电烤箱 美的集团股份有限公司; GB204 电子天平 瑞士梅特勒托利多公司; SA402B 电子舌 日本 INSENT 公司; SYKAM S-433D 全自动氨基酸分析仪 德国 SYKAM 公司; Flavour Spec® GC-IMS 联用仪 德国 G.A.S.公司。

1.2 实验方法

1.2.1 烤制鱿鱼须的制备 将自然解冻后的鱿鱼须 100.00 g 置于已预热至 200 °C 烤箱中,分别烤制 0、5、15、20 和 25 min,烤制样品分别命名为 S1、S2、S3、S4 和 S5。

1.2.2 游离氨基酸含量的测定 参考陈瑜等^[15]的测定方法并稍作修改。取 1.00 g 充分破碎后的 S1~S5 样品加入 10 mL 20% 三氯乙酸溶液,充分混匀后静置 15 min,6000 r/min 离心 15 min,取上清液滤膜(0.22 μm)过滤后测定样品中的游离氨基酸含量。

1.2.3 电子舌分析 本实验电子舌设备使用具有广域选择特异性的人工脂膜传感器,模拟生物活体的味觉感受机理,通过检测各种滋味物质和人工脂膜之间的静电作用或疏水性相互作用产生的膜电势的变化,实现对 5 种基本味(酸、甜、苦、咸、鲜)和涩味的评价。分别称取 15.00 g 充分搅拌器破碎后的 S1~S5 样品置于离心管中,加入 30 mL 的水,在 45 °C 水浴下浸提 15 min,3000 r/min 离心 5 min 后过滤,取上清液作为电子舌待测液进行测试。

电子舌测试用液: Reference 溶液(人工唾液): KCl+酒石酸; 负极清洗液: 水+乙醇+HCl; 正极清洗液: KCl+水+乙醇+KOH。

测试模式: 样品测定前需用基准液清洗传感器三次,共 330 s。之后执行 30 s 的传感器自检,连续

两次输出低于 0.5 则自检合格。合格后,30 s 内完成样品测定。测定后再次清洗两次,共 6 s。整个过程限时 30 s,数据每 1.0 s 采集一次,无延迟。环境温度保持室温。

1.2.4 GC-IMS 分析 样品前处理:分别称取 S1~S5 各 2.00 g,置于 20 mL 顶空进样瓶中,加盖密封后置于 50 °C 下孵化 20 min。

GC 条件:色谱柱:FS-SE-54-CB-1(15 m×0.53 mm×1 μm)石英毛细管柱;色谱柱温度:60 °C;载气:高纯 N₂;载气流速程序:2 mL/min,保持 2 min;10 mL/min 持续 8 min;50 mL/min 持续 10 min;150 mL/min 持续 10 min。

IMS 条件:漂移管温度 45 °C,漂移气为高纯 N₂,IMS 探测器温度 45 °C;漂移管长度 9.8 cm,管内线性电压 500 V/cm,漂移气流速 150 mL/min。

1.3 数据处理

采用 SPSS 23.0 处理数据进行主成分分析和聚类分析,Origin 8.5 软件绘图,不同处理组间的比较采用最小显著差异法,以 $P < 0.05$ 表示在统计学上存在显著差异。鱿鱼须样品中的挥发性成分采用 LAV(Laboratory Analytical Viewer)软件和 Library Search V2.2.1 软件进行分析,结合 Reporter 和 Gallery Plot 内置插件对比烤制前后鱿鱼须指纹图谱的差异。

2 结果与分析

2.1 游离氨基酸含量分析

氨基酸是重要的滋味成分和气味前体物质,还能协同其他成分影响食品整体风味^[16]。烤制前后游离氨基酸含量变化情况如表 1 所示,S1~S5 均可鉴定出 16 种游离氨基酸(色氨酸除外),这些氨基酸的含量有一定的增加或减少,表明烤制对鱿鱼须氨基酸的组成影响不大,主要影响氨基酸的含量,进而影响鱿鱼须的品质和风味。氨基酸总量在烤制过程中呈现先升后降再升高的趋势,此波动变化一方面可能是由于在烤制过程中氨基酸代谢与合成的动态过程导致^[17],另一方面可能是由于前期部分氨基酸参加美拉德反应,发生缩合或生成挥发性物质使其含量降低,而后烤制造成鱿鱼须水分蒸发、蛋白质降解,致使氨基酸含量增加^[18-19]。对比 S1 和 S5 中的氨基酸发现,含量变化最大的是谷氨酸;S2~S5 必需氨基酸含量占总氨基酸含量比值分别为 41.8%、37.6%、41.7% 和 38.4%,均超过 35%,高于 FAO/WHO 提出的标准蛋白必需氨基酸含量(35.0%),略低于鸡蛋蛋白标准(49.7%);必需氨基酸与非必需氨基酸比值分别为 71.7%、60.4%、71.4% 和 62.4%,均超过 60%,高于 FAO/WHO 提出的标准蛋白必需氨基酸含量(60.0%);其中只有 S1 的必需氨基酸含量占总氨基酸含量比值(34.9%)和必需氨基酸与非必需氨基酸比值(53.7%)未达到 FAO/WHO 提出的标准。

鱿鱼须呈味氨基酸种类丰富,其中包括谷氨酸、

表 1 鱿鱼须游离氨基酸含量(g/100 g)

氨基酸	S1	S2	S3	S4	S5
天冬氨酸	1.15±0.02 ^c	1.43±0.01 ^b	1.16±0.03 ^c	1.94±0.03 ^a	1.92±0.01 ^a
苏氨酸	0.52±0.01 ^d	0.92±0.02 ^b	0.32±0.01 ^e	1.27±0.05 ^a	0.87±0.02 ^c
丝氨酸	0.57±0.03 ^b	0.38±0.01 ^d	0.52±0.01 ^e	0.56±0.02 ^b	0.89±0.01 ^a
谷氨酸	2.08±0.03 ^c	2.60±0.02 ^c	2.21±0.05 ^d	3.43±0.01 ^b	3.55±0.04 ^a
甘氨酸	1.13±0.01 ^a	0.66±0.01 ^e	0.64±0.01 ^e	1.02±0.02 ^b	1.11±0.03 ^a
丙氨酸	0.68±0.01 ^c	0.75±0.01 ^b	0.64±0.01 ^d	1.06±0.02 ^a	1.04±0.03 ^a
缬氨酸	0.49±0.01 ^c	0.61±0.01 ^b	0.50±0.02 ^c	0.85±0.03 ^a	0.83±0.01 ^a
甲硫氨酸	0.36±0.01 ^d	0.44±0.05 ^c	0.35±0.04 ^d	0.64±0.02 ^a	0.59±0.02 ^b
异亮氨酸	0.52±0.02 ^d	0.71±0.02 ^c	0.56±0.01 ^d	1.01±0.07 ^a	0.92±0.00 ^b
亮氨酸	0.87±0.01 ^d	1.16±0.02 ^b	0.91±0.01 ^c	1.61±0.04 ^a	1.56±0.01 ^a
酪氨酸	0.40±0.01 ^c	0.38±0.05 ^d	0.33±0.02 ^d	0.64±0.03 ^a	0.55±0.00 ^b
苯丙氨酸	0.49±0.01 ^d	0.63±0.01 ^c	0.49±0.04 ^d	0.89±0.02 ^a	0.80±0.01 ^b
赖氨酸	0.79±0.02 ^c	1.20±0.03 ^c	0.90±0.01 ^d	1.49±0.03 ^b	1.57±0.01 ^a
组氨酸	0.27±0.02 ^d	0.35±0.02 ^e	0.24±0.01 ^e	0.41±0.04 ^b	0.51±0.03 ^a
精氨酸	0.86±0.03 ^d	1.06±0.02 ^c	0.79±0.03 ^c	1.43±0.02 ^b	1.48±0.02 ^a
脯氨酸	0.37±0.01 ^b	0.28±0.02 ^e	0.16±0.02 ^d	0.35±0.01 ^b	0.42±0.02 ^a
总氨基酸	11.54±0.02 ^c	13.56±0.02 ^b	10.72±0.1 ^d	18.58±0.02 ^a	18.60±0.03 ^a
必需氨基酸	4.03±0.02 ^d	5.66±0.01 ^c	4.04±0.01 ^d	7.74±0.03 ^a	7.14±0.01 ^b
非必需氨基酸	7.51±0.03 ^c	7.89±0.01 ^c	6.69±0.01 ^d	10.84±0.03 ^b	11.46±0.01 ^a

注:同一行中的不同小写字母代表不同烤制时间下的鱿鱼须游离氨基酸含量之间具有显著性差异($P < 0.05$)。

天冬氨酸等鲜味氨基酸,精氨酸、缬氨酸等苦味氨基酸,丝氨酸、苏氨酸等甜味氨基酸和苯丙氨酸、酪氨酸等芳香族氨基酸^[20-21]。鱿鱼须呈味氨基酸组成模式如图 1 所示,贡献最大的是鲜味氨基酸和苦味氨基酸,且随着烤制时间的延长,呈现先升后降再升高的趋势,与氨基酸总量变化趋势保持一致。鱿鱼须独特的风味可能与其富含呈味氨基酸有关,特别是鲜味氨基酸所占比例最高,赋予鱿鱼须丰富的鲜味。鲜味是关键滋味特征,其感知受到不同鲜味物质协同作用的影响,且鲜味和其他滋味属性相关物质之间的相互作用也会导致感官强度的变化。

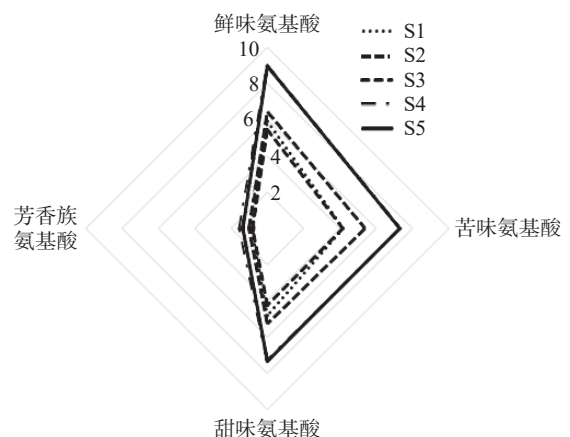


图 1 鱿鱼须呈味氨基酸组成模式图
Fig.1 Comparative profiles of flavor amino acids of squid tentacles

2.2 电子舌分析

2.2.1 鱿鱼须的滋味特征 电子舌可模拟人的味觉

机制,对样品的滋味特性进行分析,该技术操作方便快捷,在应用上可作为感官评价的替代或补充^[22]。由图2可知,鱿鱼须在烤制过程中滋味存在明显差异,酸味基本保持不变;鲜味、咸味和鲜味丰富度是最重要的味觉指标,呈现增强趋势;涩味、苦味回味和涩味回味值接近于0。

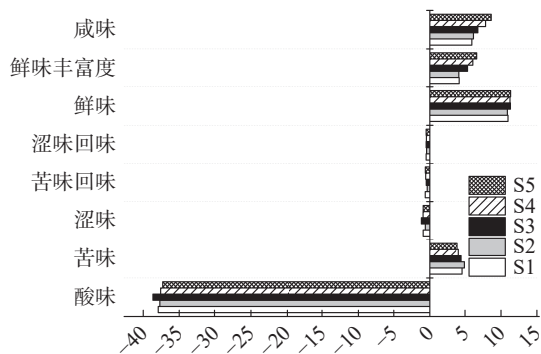


图2 鱿鱼须有效味觉指标
Fig.2 Effective taste index of squid tentacles

鲜味丰富度代表鲜味持久度,是鲜味的回味^[8]。鱿鱼须的鲜味、咸味和丰富度分析见图3, S5的鲜味、咸味和丰富度均最强。其原因可能是高温烤制有利于鱿鱼须中蛋白质与多肽的分解,从而积累鲜味氨基酸(如谷氨酸、赖氨酸^[23])和甜味氨基酸(如丝氨酸、甘氨酸等^[24]);也可能是由于烤制时间的差异,影响了鱿鱼须中各氨基酸之间的作用,进而导致美拉德反应程度不一,最终影响了鱿鱼须的风味产生。

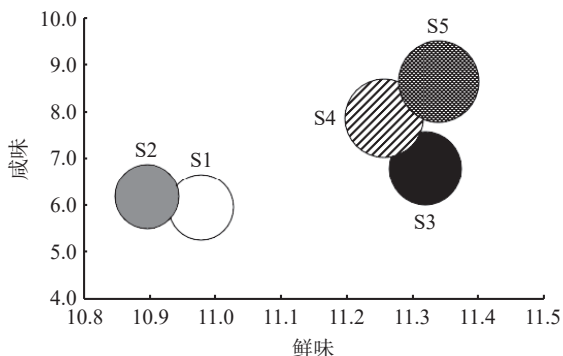


图3 鱿鱼须鲜味、咸味和丰富度气泡图
Fig.3 Bubble diagram of taste, saltiness and richness of squid tentacles
注: 气泡越大, 丰富度越强。

2.2.2 主成分分析和聚类分析 采用主成分分析(Principal Components Analysis, PCA)可将原始数据的多个指标转化为较少的具有代表性的信息数据^[20]。PCA的得分图以分散点的形式表示样本之间的距离,每个点之间的距离表示不同样本之间的差异。样本在坐标轴上投影越近,味觉相似度越高,反之亦然^[25]。由图4A可知,PC1和PC2的贡献率分别为55.81%和23.37%,总贡献率达79.18%。S1~S5分别对应的电子舌检测信号特征区域明显,尤其是S1(烤制前)和S2~S5(烤制后)有明显区分,表明烤制

前后鱿鱼须在滋味上存在明显差异,其中S4和S5味道相似(分散在相同象限),与其他组距离较远,说明烤制超过20 min 滋味变化最为明显。

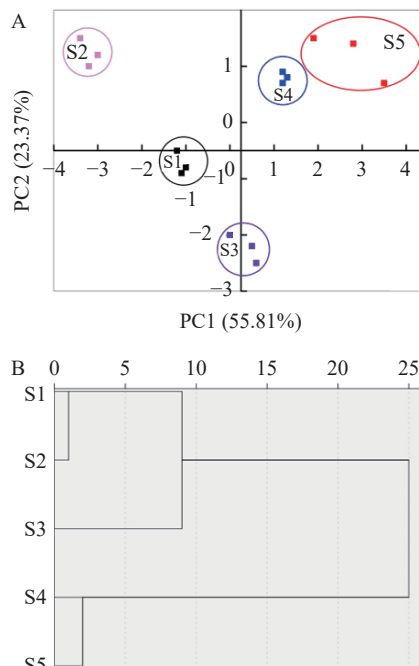


图4 鱿鱼须 PCA 评分图(A)和聚类分析图(B)
Fig.4 PCA scoring chart (A) and clustering analysis chart (B) of squid tentacles

聚类分析是基于变量的性质和特征相似性,将具有显著差异的样本划分为不同类,彼此相近的样本归为同一类^[26]。以甜味、咸味、鲜味、鲜味丰富度、酸味、涩味、苦味回味和涩味回味为变量,对鱿鱼须滋味进行系统聚类分析,结果见图4B。当类间距选择5时,可将5种不同烤制时间的鱿鱼须分为3类, S1和S2聚为一类, S3为一类, S4和S5聚为一类;当类间距选择15时,可将5种不同烤制时间的鱿鱼须分为2类, S1~S3聚为一类, S4和S5聚为一类。此分析结果与主成分分析的综合评价结果大致一致,即鱿鱼须的滋味品质在烤制的后期阶段(S4、S5)逐渐形成并稳定。

2.3 GC-IMS 分析

2.3.1 鱿鱼须风味物质气相迁移色谱分析 图5A是不同烤制时间下鱿鱼须挥发性成分3D谱图,从左至右分别为S1~S5,可直观看出鱿鱼须烤制前后挥发性风味物质浓度有明显变化,浅蓝色点和红色点数量既有增长,也有下降。为进一步比较鱿鱼须在不同烤制时间下的风味差异,结合二维图对鱿鱼须进行分析,结果如图5B所示。反应离子峰(Reactive Ion Peak, RIP, 迁移时间1.0 ms)两侧的点代表一种挥发性风味物质,点的颜色越深,面积越大表示该物质浓度越高,反之越低^[13]。有些化合物含有两个或更多的点,分别代表不同的二聚体或三聚体^[12,27]。鱿鱼须各种风味物质的保留时间集中分布在100~200 s和300~500 s之间,100~200 s保留时间区域中的部

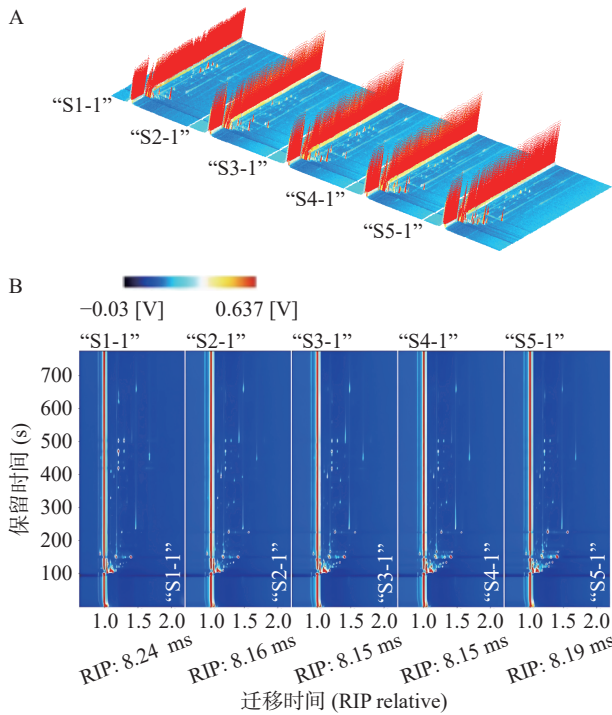


图 5 鱿鱼须特征风味 GC-IMS 三维图(A)和二维图(B)
Fig.5 GC-IMS 2D and 3D topographic of characteristic flavour components in squid tentacles

分化合物随着烤制时间的延长颜色加深,而 300~500 s 保留时间区域中的部分化合物则反之。

2.3.2 鱿鱼须风味物质 GC-IMS 分析 利用 NIST 数据库和 IMS 数据库对鱿鱼须风味物质进行 GC-IMS 分析,结果如表 2 和图 6 所示。鱿鱼须中共鉴定出风味物质共 29 种单体或者二聚体,其中 14 种醛类、3 种酮类、5 种醇类、3 种酯类、2 种酸类和 2 种烯烃类。

表 2 鱿鱼须鉴定出的风味物质

Table 2 Volatile compounds identified from squid tentacles

序号	挥发性化合物	风味描述 ^a	峰面积(a.u.)				
			S1	S2	S3	S4	S5
1	3-甲基丁醛-D	麦芽味、水果味、坚果味	1885.50±239.38 ^d	1717.87±183.88 ^d	2273.27±12.88 ^c	2810.43±231.87 ^b	3635.43±62.07 ^a
2	3-甲基丁醛-M	麦芽味、水果味、坚果味	710.49±4.85 ^c	716.34±26.11 ^c	732.45±12.88 ^b	750.58±37.24 ^a	702.19±19.86 ^c
3	丙醛-D	/	1141.42±279.95 ^b	1121.88±361.23 ^b	1213.05±27.43 ^a	708.90±190.65 ^c	624.22±13.37 ^d
4	丙醛-M	/	1603.18±22.49 ^{ab}	1633.04±113.59 ^a	1485.82±90.78 ^b	1613.72±26.36 ^a	1647.65±29.69 ^a
5	壬醛	花香、柑橘香	326.57±13.09 ^b	365.31±23.90 ^a	390.47±5.24 ^a	286.75±65.03 ^c	250.85±10.80 ^d
6	己醛-D	青草香	122.46±23.20 ^c	906.87±675.46 ^b	622.30±56.79 ^c	434.70±140.55 ^d	1151.94±300.20 ^a
7	己醛-M	青草香	449.23±51.06 ^d	1195.87±353.20 ^b	1046.67±32.38 ^{bc}	915.87±113.47 ^c	1477.87±153.91 ^a
8	庚醛	油脂香	72.26±3.20 ^c	114.69±11.09 ^b	133.41±70.31 ^a	118.02±15.75 ^b	120.48±2.83 ^{ab}
9	苯甲醛-D	坚果、焦糖香	96.81±8.77 ^c	140.64±33.02 ^a	142.49±42.07 ^a	110.59±25.67 ^b	101.99±4.39 ^{bc}
10	苯甲醛-M	坚果、焦糖香	173.99±20.61 ^d	426.90±164.69 ^a	398.33±47.24 ^b	289.88±56.17 ^{cd}	296.26±51.43 ^c
11	戊醛-D	/	34.96±6.73 ^c	133.52±58.67 ^d	214.54±37.33 ^c	349.57±137.03 ^b	406.22±12.63 ^a
12	戊醛-M	/	239.67±45.98 ^d	521.93±83.34 ^c	637.42±3.78 ^b	758.25±107.29 ^a	807.15±18.39 ^a
13	2-甲基丙醛-D	樟脑味	128.55±26.57 ^c	83.99±18.40 ^d	130.93±3.75 ^c	267.86±12.45 ^b	540.27±31.84 ^a
14	2-甲基丙醛-M	樟脑味	775.22±51.35 ^c	1013.68±1.77 ^b	1071.17±5.81 ^a	753.50±78.79 ^c	582.37±25.68 ^d
15	2-丁酮-D	芳香气味、奶香味	217.70±51.52 ^c	170.83±28.47 ^d	222.28±4.25 ^c	331.79±7.76 ^b	518.54±7.34 ^a
16	2-丁酮-M	芳香气味、奶香味	348.76±95.27 ^b	337.79±21.17 ^b	299.39±8.14 ^c	322.34±42.81 ^{bc}	406.52±7.51 ^a
17	3-辛酮	果香	290.43±44.56 ^a	105.29±18.55 ^{cd}	163.39±4.81 ^b	110.27±6.03 ^c	124.69±7.69 ^c

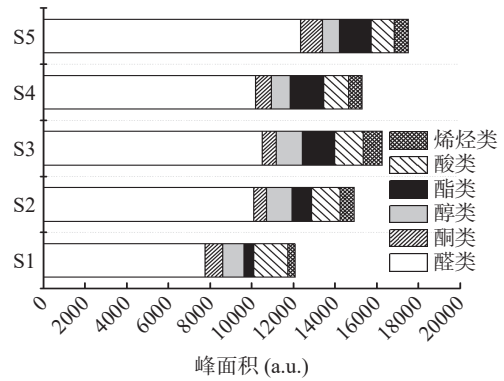


图 6 鱿鱼须风味物质峰面积

Fig.6 Peak area of flavor substance content in squid tentacles

2.3.2.1 醛类物质变化 醛类物质主要来源于脂质氧化产生的典型化合物,具有花香、果香以及甜味,可提高风味品质^[12],由于其气味阈值低,在鱿鱼须整体风味中占主导地位,主要包括 3-甲基丁醛、丙醛、戊醛、2-甲基丙醛、壬醛、己醛、庚醛和苯甲醛,其结果与胡燕燕^[28]、Liu 等^[29]对烤制羊肉测定结果相似,都证明了醛类是肉制品中的主要香气成分。检测到的挥发性物质中,大部分为醛类风味物质,共 14 种,多为不饱和脂肪酸的衍生物,为风味提供了良好的物质基础。烤制会加快不饱和脂肪酸的氧化产生自由基,攻击其他不太敏感的脂肪酸及油酸,戊醛、己醛、庚醛、壬醛和苯甲醛都是烤制鱿鱼须中的主要挥发性化合物,其原因可能是它们气味阈值较低,浓度高于其他脂质降解化合物^[28]。醛类物质含量随着烤制时间的延长呈现增加的趋势,在 S2~S5 之间差异性明显,S1 和 S2 之间差异性不明显,其原因可能是 S1 和 S2 烤制时间过短(5 min)。醛类物质中又以 3-甲基丁醛含量最高,具有麦芽味、水果味、坚果味^[30],3-

续表 2

序号	挥发性化合物	风味描述 ^a	峰面积(a.u.)				
			S1	S2	S3	S4	S5
18	2-乙基己醇	柑橘、花香	62.59±10.52 ^b	114.83±12.44 ^a	125.24±18.54 ^a	60.29±19.84 ^b	53.49±8.10 ^{bc}
19	2-呋喃甲硫醇	咖啡香	326.05±92.82 ^a	270.58±20.26 ^b	107.73±24.22 ^c	67.80±14.99 ^d	70.86±12.56 ^d
醇(5)	20 乙醇	酒香	239.87±69.00 ^d	327.46±31.08 ^a	342.59±8.57 ^a	293.11±86.34 ^b	262.58±13.04 ^c
	21 芳樟醇	铃兰香	167.43±28.23 ^a	119.45±2.27 ^b	118.38±17.22 ^b	163.84±92.19 ^a	157.55±29.54 ^{ab}
	22 异丙醇	/	199.86±60.34 ^d	391.31±61.49 ^b	576.28±3.05 ^a	340.85±151.11 ^{bc}	269.24±20.98 ^c
酯(3)	23 乙酸乙酯-D	果香	82.24±22.40 ^d	244.73±65.68 ^c	613.42±3.15 ^b	680.14±14.91 ^a	656.30±58.37 ^{ab}
	24 乙酸乙酯-M	果香	322.26±19.72 ^c	540.11±70.64 ^b	759.38±18.53 ^a	760.55±50.09 ^a	737.25±13.52 ^{ab}
	25 丁酸丙酯	香蕉、菠萝香	87.84±0.47 ^c	146.38±44.85 ^b	169.52±23.56 ^a	166.26±38.67 ^a	143.43±8.43 ^b
酸(2)	26 乙酸	酸味	1298.29±110.75 ^a	1273.96±129.58 ^a	1206.07±9.88 ^{ab}	1089.96±18.13 ^b	962.25±13.76 ^c
	27 己酸	果香、脂肪	332.06±80.07 ^a	119.02±26.19 ^d	170.72±19.34 ^b	110.76±2.25 ^d	125.95±3.07 ^c
烯炔类(2)	28 柠檬烯-D	柑橘、柠檬香	918.75±192.95 ^a	305.01±64.43 ^{cd}	405.27±15.21 ^b	284.42±29.08 ^d	366.09±2.00 ^c
	29 柠檬烯-M	柑橘、柠檬香	832.74±142.38 ^a	360.72±74.37 ^c	497.79±10.92 ^b	338.91±5.25 ^{cd}	321.48±6.20 ^d

注: D: 表示该化合物二聚体, M: 表示该化合物单体; ^a风味描述, 参考来源<http://www.thegoodscentscompany.com/>; 同一行中的不同小写字母代表不同烤制时间下的鱿鱼须风味物质峰面积之间具有显著性差异(P<0.05)。

甲基丁醛主要是由亮氨酸分解代谢产生, 因其平均风味阈值较其他醛类物质低(在水溶液中为 0.06 μg/mL)^[31], 对烤制鱿鱼须风味贡献较大。

2.3.2.2 酮类物质变化 酮类物质属于不稳定的中间体, 主要也来源于脂质氧化。酮类物质含量随着烤制时间的延长呈现先降后增的趋势。GC-IMS 鉴定出的酮类物质主要为 2-丁酮和 3-辛酮, 其中 2-丁酮为烤鱿鱼须提供芳香气味和奶香味, 与胡燕燕^[28] 研究结果一致; 3-辛酮可呈现果香。

2.3.2.3 醇类物质变化 醇类物质风味与化合物本身碳原子数有关, 碳原子少于 3 个以下的醇类大多具有宜人的香气, 而碳原子多于 7 个的醇类则具有芳香气味^[32]。醇类物质主要作为脂质氧化的反应产物, 对整体气味具有协同作用。GC-IMS 鉴定出的醇类物质有 2-乙基己醇、2-呋喃甲硫醇、乙醇、芳樟醇和异丙醇。由于大部分饱和醇类物质阈值较高, 对气味贡献较小, 但仍然能作为酯类物质的前体风味成分^[33]。

2.3.2.4 酯类物质变化 酯类物质多呈现果香味, 具

有低气味检测阈值, 是一种重要的呈香物质。GC-IMS 鉴定出的酯类物质主要包括乙酸乙酯和丁酸丙酯, 含量相对较少, 其中以乙酸乙酯含量最高。酯类物质的来源其一主要来源于酸和醇的酯化反应, 其二是由长链脂肪酸酯化得到^[34]。3 种酯类物质在 S1~S5 五个烤制时间下均有出现, 且在 S3 和 S4 阶段含量达到最高, 但由于酯类物质挥发性小, 对风味贡献较小。

2.3.2.5 酸类物质变化 酸类物质是酮、醛和酯类等化合物的重要前体物质, 主要来自脂肪、氨基酸的降解以及乳糖的发酵^[35], 尽管酸类物质阈值相对较高, 对香味影响不大, 但酸是其他可挥发性香味物质的重要中间产物, GC-IMS 鉴定出的酸类物质主要包括乙酸和己酸, S1~S5 的酸类物质含量随着烤制时间的延长呈现下降的趋势, 说明烤制可以改善鱿鱼的酸味。

2.3.2.6 烃类物质变化 在烤制过程中, 肉制品和脂肪的不完全燃烧会产生烃类化合物, 它的阈值比较高

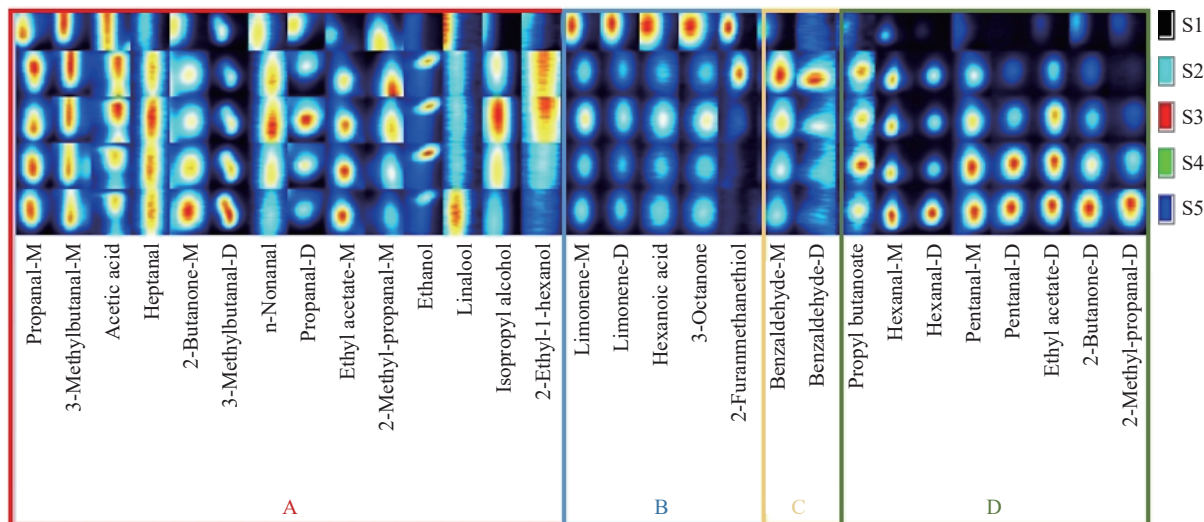


图 7 鱿鱼须挥发性风味物质指纹图谱

Fig.7 Fingerprint of volatile compounds in squid tentacles

且大多数烃类化合物香气较弱或无味,对整体风味的贡献较小,能够识别出的含量也比较低,对样品整体风味的贡献不大,但它可以改善肉的整体风味^[36]。GC-IMS 鉴定出的柠檬烯是可为样品带来柑橘、柠檬风味。

2.3.3 鱿鱼须风味物质指纹图谱 为进一步了解挥发性化合物在鱿鱼须烤制过程中的动态变化及差异性,采用 Gallery Plot 插件生成可视化指纹图谱如图 7 所示。每个化合物的信号越亮,其信号强度越强^[37]。图 7 中横坐标表示 29 种风味物质,纵坐标表示 S1~S5,每一列代表不同样品中相同香气化合物成分(红色信号越强,表明该物质含量相对越高)。由图 7 可见,A 区域风味物质的浓度随着烤制时间的延长而无明显变化;B 区域和 C 区域风味物质点亮度发生明显变化,说明 S1~S5 鱿鱼须中的挥发性风味物质组成存在明显差异,B 区域风味物质浓度随着烤制时间的延长呈现减小的趋势,特别是柠檬烯-D、柠檬烯-M、己酸、3-辛酮、2-呋喃甲硫醇;C 区域风味物质浓度随着烤制时间的延长呈现先增加后减少的趋势,在烤制时间为 5 min 时最大,特别是苯甲醛-D 和苯甲醛-M;D 区域风味物质随着烤制时间的延长,风味物质浓度呈现不同程度的增加趋势,特别是丁酸丙酯、己醛-D、己醛-M、戊醛-D、戊醛-M、乙酸乙酯-D、2-丁酮-D 和 2-甲基丙醛-D,其原因可能是鱿鱼须烤制过程中发生了美拉德反应、脂类氧化,此外烤制可促进鱿鱼须中风味物质的释放,从而使风味物质增加^[12]。

3 结论

本研究通过气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS)和电子舌技术,对鱿鱼须烤制过程中的风味轮廓变化进行了深入分析。实验结果显示,烤制过程中鱿鱼须的风味物质发生了显著变化。硫醇、乙醇、芳樟醇和异丙醇等醇类物质在烤制初期至中期含量逐渐增加,后期略有下降,这些醇类物质为鱿鱼须提供了丰富的香气背景。酯类物质如乙酸乙酯和丁酸丙酯,在烤制中期达到含量高峰,赋予鱿鱼须果香特征。酸类物质如乙酸和己酸,随着烤制时间的延长呈现下降趋势,表明烤制有助于减轻鱿鱼的酸味。烃类物质如柠檬烯,尽管对整体风味贡献较小,但能增添柑橘类风味。通过指纹图谱分析,进一步揭示了不同烤制时间下风味物质的动态变化,为优化鱿鱼须烤制工艺和提升产品品质提供了科学依据。综上所述,本研究不仅加深了对鱿鱼须烤制过程中风味变化的理解,也为相关海产品的风味调控提供了有价值的参考。

© 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] 王兴伟. 基于炒制猪肉风味质构形成机制的微波加工及调控方法[D]. 无锡: 江南大学, 2023. [WANG X W. Microwave

processing and control methods based on the flavor and texture formation mechanism of stir-fried pork[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.]

[2] 张春江, 张良, 黄峰, 等. 中式肉类菜肴加工中营养品质变化研究进展[J]. 生物产业技术, 2017(4): 76-81. [ZHANG C J, ZHANG L, HUANG F, et al. Progress of nutrition changes of Chinese meat cuisines during processing[J]. Biotechnology & Business, 2017(4): 76-81.]

[3] BAI S, LUO Y R, SHEN R M, et al. Formation of flavor volatile compounds at different processing stages of household stir-frying mutton sao zi in the northwest of China[J]. LWT-Food Science & Technology, 2021, 139(1): 110735.

[4] 柏霜, 尤丽琴, 罗瑞明, 等. 中式烤制滩羊肉香气活性物质分析[J]. 中国食品学报, 2023, 23(5): 311-321. [BAI S, YOU L Q, LUO R M, et al. Analysis of aroma active compounds in chinese stir-fried tan mutton[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(5): 311-321.]

[5] 胡磊, 谢庆超, 潘迎捷, 等. 蒸制和煮制对中华绒螯蟹中胆固醇和脂肪酸含量的影响[J]. 上海海洋大学学报, 2023, 32(3): 649-659. [HU L, XIE Q C, PAN Y J, et al. Effect of steaming and boiling on the cholesterol and fatty acid content in Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2023, 32(3): 649-659.]

[6] CHEN Y, LI P, LIAO L Y, et al. Characteristic fingerprints and volatile flavor compound variations in Liuyang Douchi during fermentation via HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. Food Chemistry, 2021, 361: 130055.

[7] 姜鹏飞, 柳杨, 张浩, 等. 气相色谱-离子迁移谱在水产领域的应用[J]. 中国食品学报, 2023, 23(6): 431-440. [JIANG P F, LIU Y, ZHANG H, et al. Application of gas chromatography-ion mobility spectrometry in aquaculture[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(6): 431-440.]

[8] 许丹, 朱剑, 陈瑜, 等. 智能感官分析技术结合传统感官评价对细点圆趾蟹蟹肉制品品质特性研究[J]. 浙江大学学报(理学版), 2022, 49(3): 336-343. [XU D, ZHU J, CHEN Y, et al. Study on quality characteristics of crab meat products of *Ovalipes punctatus* by intelligent sensory analysis combined with traditional sensory evaluation[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 2022, 49(3): 336-343.]

[9] 董萍. 智能感官技术在中餐烹饪中的应用[J]. 肉类工业, 2022(3): 39-43. [DONG P. Application of intelligent sensory technology in Chinese cuisine[J]. Meat Industry, 2022(3): 39-43.]

[10] 姜燕, 郭海南, 于润美, 等. 智能感官技术在大米及米酒感官品质分析中的应用[J]. 食品研究与开发, 2018, 39(18): 32-37. [JIANG Y, GUO H N, YU R M, et al. Application of intelligent sensory instruments in sensory quality analysis of rice and rice wine[J]. Food Research and Development, 2018, 39(18): 32-37.]

[11] 范思华. 沙蟹汁中氨基酸和小分子肽对其鲜味影响的研究[D]. 南宁: 广西大学, 2019: 12-25. [FAN S H. Effects of amino acids and oligopeptides on the umami of soldier crab sauce[D]. Nanning: Guangxi University, 2019: 12-25.]

[12] 陈丽兰, 陈祖明, 袁灿. 气相色谱-离子迁移谱结合化学计量法分析不同烤制时间对郫县豆瓣酱挥发性化合物的影响[J]. 食品科学, 2023, 44(14): 283-290. [CHEN L L, CHEN Z M, YUAN C. Effect of cooking time on volatile compounds of pixian bean paste determined by gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with chemometrics[J]. Food Science, 2023, 44(14): 283-290.]

[13] 徐永霞, 白旭婷, 冯媛, 等. 基于 GC-IMS 和化学计量学分析海鲈鱼肉蒸制过程中风味物质的变化[J]. 食品科学, 2021, 42(22): 270-275. [XU Y X, BAI X T, FENG Y, et al. Changes of

- flavor compounds in sea bass during steaming process as analyzed by gas chromatography-ion mobility spectroscopy and chemometrics[J]. *Food Science*, 2021, 42(22): 270-275.]
- [14] 刘胜男, 刘云锋, 曹荣, 等. 加工方式对玉筋鱼干风味的影响[J]. *食品科学*, 2021, 42(20): 167-172. [LIU S N, LIU Y F, CAO R, et al. Effects of processing methods on the flavor of dried *Ammodytes personatus*[J]. *Food Science*, 2021, 42(20): 167-172.]
- [15] 陈瑜, 马剑锋, 许丹, 等. 基于两步水解法制备三疣梭子蟹调味品酶解工艺优化研究[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2022, 48(3): 321-335. [CHEN Y, MA J F, XU D, et al. Optimization of enzymolysis technology for preparing *Portunus trituberculatus* seasoning based on a two-step hydrolysis method[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2022, 48(3): 321-335.]
- [16] 许丹, 朱剑, 严忠雍, 等. 加工方式对金枪鱼鱼糜制品氨基酸组成和营养价值影响研究[J]. *中国调味品*, 2020, 45(11): 74-80. [XU D, ZHU J, YAN Z Y, et al. Amino acid composition and nutritional value of tuna surimi products prepared by different processing methods[J]. *China Condiment*, 2020, 45(11): 74-80.]
- [17] 刘梦, 张顺亮, 臧明伍, 等. 基于非靶向代谢组学分析牛肉干法成熟过程代谢产物的变化[J]. *食品科学*, 2023, 44(10): 249-256. [LIU M, ZHANG S L, ZANG M W, et al. Non-targeted metabolomics analysis of metabolite changes in beef during dry aging[J]. *Food Science*, 2023, 44(10): 249-256.]
- [18] 杨昭, 梁瑞进, 姚玉静, 等. 烤制温度对酱油游离氨基酸变化规律的影响[J]. *中国调味品*, 2020, 45(5): 142-146. [YANG Z, LIANG R J, YAO Y J, et al. Effect of frying temperature on the change rule of free amino acids in soy sauce[J]. *China Condiment*, 2020, 45(5): 142-146.]
- [19] RYU S, PARK M R, MABURUTSE B E, et al. Diversity and characteristics of meat microbiological community on dry aged beef[J]. *Journal of Microbiology & Biotechnology*, 2018, 28(1): 105-108.
- [20] 帕尔哈提·柔孜, 则拉莱·司马依, 刘源, 等. 3种甘草种子蛋白游离氨基酸组成及呈味特性的对比分析[J]. *食品研究与开发* 2023, 44(8): 53-60, 218. [PAERHATI-R M, ZELALAI-S M Y, LIU Y, et al. Comparative analysis of free amino acid composition in proteins of seeds of three glycyrrhiza species and the flavor characteristics[J]. *Research and Development*, 2023, 44(8): 53-60, 218.]
- [21] JIN Y Z, XU M H, JIN Y S, et al. Simultaneous detection and analysis of free amino acids and glutathione in different shrimp[J]. *Foods*, 2022, 11: 2599.
- [22] 沙小梅, 蒋文丽, 李鑫, 等. 不同烹饪方式小龙虾的风味特征分析[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(13): 288-296. [SHA X M, JIANG W L, LI X, et al. Analysis of flavor characteristics of *Procambarus clarkia* in different cooking methods[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(13): 288-296.]
- [23] YU Z L, JIANG H R, GUO R C, et al. Taste, umami-enhance effect and amino acid sequence of peptides separated from silkworm pupa hydrolysate[J]. *Food Research International*, 2018, 108: 144-150.
- [24] WANG H L, ZHANG J J, ZHU Y Z, et al. Volatile components present in different parts of grass carp[J]. *Journal of Food Biochemistry*, 2018, 42: e12668.
- [25] 冯敏, 汪敏, 常国斌, 等. 电子鼻检测辐照肉鸭产品的挥发性风味物质[J]. *核农学报*, 2019, 30(6): 1116-1121. [FENG M, WANG M, CHANG G B, et al. The detection of volatile flavor substances of irradiated duck products by electronic nose[J]. *Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 30(6): 1116-1121.]
- [26] 王玲, 吴盈萍, 李海英, 等. 28日龄塔里木鸽与白卡奴鸽体重和体尺的聚类与主成分分析[J]. *饲料研究*, 2023, 46(16): 55-60. [WANG L, WU Y P, LI H Y, et al. Clustering and principal component analysis of weight and body size for 28-day-old Tarim pigeon and white Carneau pigeon[J]. *Feed Research*, 2023, 46(16): 55-60.]
- [27] LI X F, ZHU J C, LI C, et al. Evolution of volatile compounds and spoilage bacteria in smoked bacon during refrigeration using an e-nose and gc-ms combined with partial least squares regression[J]. *Molecules*, 2018, 23: 3286.
- [28] 胡燕燕. 羊肉电烤制工艺研究及其特征风味物质解析[D]. 石河子: 石河子大学, 2023: 45-47. [HU Y Y. Research on electric roasting process of mutton and its research analysis of characteristic flavor substances [D]. Shihezi: Shihezi University, 2023: 45-47.]
- [29] LIU H, HUI T, FANG F, et al. The formation of key aroma compounds in roasted mutton during the traditional charcoal process[J]. *Meat Science*, 2022, 184: 108689.
- [30] 马勇, 魏从娇, 王雍雍, 等. 发酵香肠中3-甲基丁醛产生途径的研究进展[J]. *食品与发酵工业*, 2023, 49(9): 324-333. [MA Y, WEI C J, WANG Y Y, et al. Research progress on the production pathway of 3-methylbutanal in fermented sausage[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2023, 49(9): 324-333.]
- [31] SMIT B A, ENGELS W J M, SMIT G. Branched chain aldehydes: Production and breakdown pathways and relevance for flavour in foods[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2009, 81(6): 987-999.
- [32] 陈丽兰, 陈祖明, 袁灿. 郫县豆瓣烤制后挥发性风味物质的分析[J]. *中国调味品*, 2020, 45(4): 177-180. [CHEN L L, CHEN Z M, YUAN C. Analysis of volatile flavor components of fried pixian soybean paste[J]. *China Condiment*, 2020, 45(4): 177-180.]
- [33] 余远江, 庞一扬, 袁桃静, 等. 基于电子鼻、HS-GC-IMS和HS-SPME-GC-MS分析五种水产原料的风味特征[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(19): 106-117. [YU Y J, PANG Y Y, YUAN T J, et al. Analysis of flavor characteristics of five aquatic raw materials based on electronic nose, HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(19): 106-117.]
- [34] 刘薇, 陈敏, 徐雅倩, 等. 烤制时间对中式烤五花肉挥发性风味物质的影响[J]. *中国调味品*, 2021, 46(10): 54-58. [LIU W, CHEN M, XU Y Q, et al. Effect of roasting time on the volatile flavor compounds of Chinese roasted pork belly[J]. *China Condiment*, 2021, 46(10): 54-58.]
- [35] 陈臣, 田同辉, 刘政, 等. 基于感官评价、GC-IMS和GC-MS的中式酸凝奶酪挥发性风味比较[J]. *食品科学*, 2023, 44(16): 228-236. [CHEN C, TIAN T H, LIU Z, et al. Comparative study on volatile flavor of chinese acid-curd cheese using sensory evaluation, gas chromatography-ion mobility spectrometry and gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Food Science*, 2023, 44(16): 228-236.]
- [36] 谭馨怡, 卢云浩, 任尧, 等. 不同陈酿时间下郫县豆瓣挥发性风味化合物及标志性风味成分解析[J]. *中国调味品*, 2021, 46(10): 43-46. [TAN X Y, LU Y H, REN Y, et al. Analysis of volatile flavor compounds and characteristic flavor components of Pixian bean paste at various aging time[J]. *China Condiment*, 2021, 46(10): 43-46.]
- [37] 金文刚, 刘俊霞, 赵萍, 等. 基于顶空气相色谱-离子迁移谱分析洋县不同色泽糙米蒸煮后挥发性风味物质差异[J]. *食品科学*, 2022, 43(18): 258-264. [JIN W G, LIU J X, ZHAO P, et al. Analysis of the differences in volatile flavorsubstances in Yangxian brown rice of diferent colors ater cooking based on headspace gas chromatography-ionmobility spectrometry[J]. *Food Science*, 2022, 43(18): 258-264.]