

斑点叉尾鮰不同部位中化学特性和挥发性化合物差异分析

谢霞婷, 刘莹, 车桂香, 欧妍, 卢思思, 马瑞东, 杨子毅, 刘小玲*

(广西大学轻工与食品工程学院, 广西高校特色农产品精深加工与安全重点实验室, 广西南宁 530004)

摘要: 为研究新鲜斑点叉尾鮰不同部位的化学特性和挥发性化合物之间的差异, 对侧线鱼肉、背侧线鱼肉、腹侧鱼肉和鱼皮的化学特性和挥发性化合物进行对比分析。结果显示: 斑点叉尾鮰为高蛋白和高脂肪的淡水鱼, 脂肪酸、脂肪与关键挥发性化合物显著相关; 侧线鱼肉的血红蛋白和 TBA 含量最大, 分别为 1.24 mg/kg 和 1.59 mg/kg, 关键挥发性化合物种类最多 (11 种), 腹侧鱼肉的脂肪含量最高, 为 9.86 g/100 g, 背侧线鱼肉水分含量最高, 为 72.21 g/100 g, 鱼皮的总脂肪酸含量最大, 为 268.17 mg/g, 挥发性化合物种类最多 (33 种); 感官评价、电子鼻、脂肪酸、GC-IMS 和 GC-MS 显示四个部位的挥发性化合物种类和含量不一, 己醛、桉叶醇、正辛醛、正己醇、壬醛、1-辛烯-3-醇、(E)-2-壬烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、土臭素和对甲酚是造成四个部位气味各异的主要物质。该研究表明斑点叉尾鮰的鱼皮在大部分化学特性和挥发性化合物中比侧线、背侧线和腹侧鱼肉突出, 可为后续各部位的加工利用提供理论依据。

关键词: 斑点叉尾鮰; 不同部位; 化学特性; 挥发性化合物

文章编号: 1673-9078(2026)1-297-309

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.1.1482

Differential Analysis of Chemical Characteristics and Volatile Compounds in Different Parts of *Ictalurus punctatus*

XIE Xiating, LIU Ying, CHE Guixiang, OU Yan, LU Sisi, MA Ruidong, YANG Ziyi, LIU Xiaoling*

(College of Light Industry and Food Engineering, Guangxi University, Key Laboratory of Deep Processing and Safety Control for Specialty Agricultural Products in Guangxi Universities, Nanning 530004, China)

Abstract: The chemical characteristics and volatile compounds of lateral line meat, dorsal meat, ventral meat, and fish skin were compared to study the differences between the chemical properties and volatile compounds of different parts of fresh *Ictalurus punctatus*. The results showed that the *I. punctatus* is a high-protein and high-fat freshwater fish, and fatty acids and fat were significantly correlated with key volatile compounds. Lateral line meat had the highest hemoglobin and TBA contents (1.24 mg/kg and 1.59 mg/kg, respectively) and the largest number of key volatile compounds (11); ventral meat had the highest fat content (9.86 g/100 g); dorsal meat had the highest moisture content (72.21 g/100 g); and fish skin had the highest total fatty acid content (268.17 mg/g) and the largest number of volatile compounds (33). Sensory evaluation, electronic nose, fatty acid analysis, GC-IMS, and GC-MS indicated that the types and contents of volatile compounds differed among the four parts. Hexanal, eucalyptol, octanal, 1-hexanol, nonanal, 1-octen-3-ol, (E)-2-nonenal, (E,E)-2,4-nonadienal, (E,E)-2,4-decadienal, geosmin, and p-cresol were the main substances responsible for the different odors of the four parts. This study showed that the

引文格式:

谢霞婷, 刘莹, 车桂香, 等. 斑点叉尾鮰不同部位中化学特性和挥发性化合物差异分析[J]. 现代食品科技, 2026, 42(1): 297-309.

XIE Xiating, LIU Ying, CHE Guixiang, et al. Differential analysis of chemical characteristics and volatile compounds in different parts of *Ictalurus punctatus* [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(1): 297-309.

收稿日期: 2024-10-08; 修回日期: 2024-12-16; 接受日期: 2024-12-23

作者简介: 谢霞婷 (1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品贮藏与加工, E-mail: 1981735960@qq.com

通讯作者: 刘小玲 (1972-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 水产品的开发与利用, E-mail: 1106113912@qq.com

skin of *I. punctatus* exhibits higher levels of most chemical and volatile compounds than the lateral line, dorsal, and ventral meat, providing a theoretical basis for the processing and utilization of different body parts.

Key words: *Ictalurus punctatus*; different parts; chemical characteristics; volatile compounds

斑点叉尾鮰 (*Ictalurus punctatus*), 也被称为沟鲶 (Channel Catfish), 是鲶形目、鮰科鱼类。由于斑点叉尾鮰生长快、产量高、易繁殖、易饲养, 已推广到广东、广西、湖南等 20 多个省市, 成为我国重要的水产养殖经济鱼类之一。2023 年总产量达到 44.10 万吨^[1], 因其氨基酸均衡、口感鲜嫩和没有肌间刺等优点备受消费者喜爱。目前, 国内斑点叉尾鮰主要以鲜食为主, 部分以半成品形式销售, 如生鱼片、鱼翅和鱼肚等冷冻鲜品, 一般以冻鱼片、冻鱼段等初级加工形式出口, 深加工比例严重不足, 且品种单一、生产规模小。此外, 如何减少斑点叉尾鮰存在的泥土味和鱼腥味等异味依然是斑点叉尾鮰加工急需解决和突破的重要问题。研究表导致异味的化学物质是土臭素和 2-甲基异冰片^[2]。此外, 己醛、庚醛、(E)-2-壬烯醛、1-辛烯-3-醇、辛醇和 2,3-辛二酮可能造成异味^[2]。

酶促过程、脂质氧化以及环境或热引发反应都会产生与异味相关的化学物质, 而且不同部位所产生的腥味的物质也不同^[3]。有研究表明鱼类中不同部位的化学成分, 脂质组成, 促氧化剂和抗氧化剂以及氧气可用性均有差异, 导致不同部位异味程度不一^[4]。Phetsang 等^[2]研究表明化学成分和脂质组成的差异导致杂交鲶鱼 (*Clarias macrocephalus* × *Clarias gariepinus*) 不同肌肉部位主要异味物质不同。Percival 等^[5]研究也表明, 养殖鲈鱼 (*Lates calcarifer*) 不同部位的异味物质与脂肪具有相关性。深色肌肉中的脂质氧化速率、肌红蛋白和铁含量过高可能跟其具有强促氧化剂有关^[6]。Sohn 等^[7]研究表明养殖鳊鱼 (*Seriola quinqueradiata*) 中肌肉颜色的深浅与异味程度相关, 深色肌肉的脂质氧化速率高于浅色肌肉, 导致鱼腥味和变质味重。

综上, 本文通过分析斑点叉尾鮰不同部位中化学特性和挥发性化合物的差异性, 探讨不同部位中化学特性与挥发性化合物的相关性, 确定不同部位中的关键挥发性化合物, 以期为斑点叉尾鮰各部位的加工利用提供基础数据与理论基础。

1 材料与方法

1.1 原料与试剂

鲜活斑点叉尾鮰, 体长 30~35 cm, 体质量 1~1.5 kg (购自南宁市建政商业广场)。

37 种正构烷烃混标 C7-C40, 上海安谱实验科技股份有限公司; 37 种脂肪酸甲酯混标 C4-C22、十一酸甲酯、三氯化硼-甲醇, 上海源叶生物科技有限公司; 硫酸 (AR)、三氯甲烷 (AR), 南宁蓝天实验设备有限公司; 甲醇 (AR)、三氯乙酸 (AR)、氢氧化钠 (AR)、氯化钠 (AR), 成都市科隆化学品有限公司。

1.2 主要仪器

SQP 电子天平, 德国 Sartorius 公司; 3 nh-NR 110 分光测色计, 深圳市三恩时科技有限公司; FlavourSpec®1H1-00053 气相离子迁移谱, 德国 G.A.S 公司; PEN3 电子鼻, 德国 Airsense 公司; 7890B GC System 气相质谱, 美国安捷伦科技有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品前处理

将斑点叉尾鮰的侧线鱼肉、背侧线鱼肉、腹侧鱼肉和鱼皮分别放入匀浆机搅成碎末状, 备用。不同部位鱼肉划分如图 1 所示:

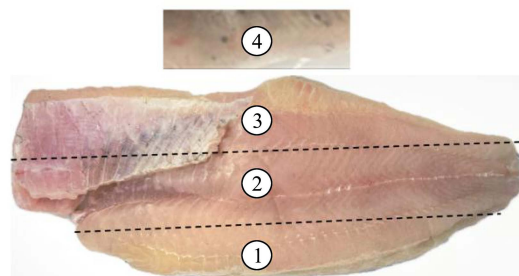


图 1 斑点叉尾鮰不同部位的划分位置

Fig.1 Muscle locations of *Ictalurus punctatus* tissues

注: ①: 背侧线鱼肉 (Dorsal Meat, DM); ②: 侧线鱼肉 (Lateral Line Meat, LM); ③: 腹侧鱼肉 (Ventral Meat, VM); ④: 鱼皮 (Fish Skin, FS)。

1.3.2 基本营养成分分析

分别参照 GB 5009.3-2016 (直接干燥法)、GB 5009.4-2016、GB5009.5-2016 (凯氏定氮法)、GB5009.6-2016 (索氏抽提法) 对水分、灰分、粗蛋白及粗脂肪进行测定。

1.3.3 色差分析

采用 3 nh-NR 110 分光测色计进行测定。选择白板校正后, 按照界面提示音把测量口径对准白板, 按

下测量键确定；白板校正成功后选择黑板校正，根据界面提示，把测量口径对空，并再次按下测量键。黑板白板校正后即可测定样品，通过显示屏直接读取数据。

1.3.4 血红蛋白分析

参考 Chai 等^[8]的方法，分别在鱼体四个部位样品组织中加入 3 倍质量的磷酸盐缓冲液（pH 值为 7、含 5% 十二烷基硫酸钠），13 500 r/min 下匀浆 30 s，然后在 85 ℃ 下水浴加热 1 h，冷却后在 4 ℃ 下以 5 500 r/min 离心 15 min，取上清液，测吸光度，以磷酸盐缓冲液为空白，牛血红蛋白做标准曲线，以 mg/kg 样品计算。

1.3.5 TBA 分析

参考宣晓婷等^[9]的方法，分别准确称取 5.0 g 鱼体四个部位样品组织，加入 50 mL 三氯乙酸（体积分数 7.5%，内含质量分数 0.1% 的乙二胺四乙酸），搅拌均匀后过滤。取 5 mL 滤液，加入 5 mL TBA 溶液（0.02 mol/L），沸水浴保温 40 min，冷却至室温后以 5 500 r/min 离心 25 min，弃沉淀，在上清液中加入 5 mL 氯仿，振荡均匀，静置分层后，取上清液，分别在波长 532 nm 和 600 nm 下测吸光度。根据公式（1）计算 TBA 含量。

$$TBA = \frac{A_{532} - A_{600}}{M} \times \frac{1}{m} \times M_r \times 100 \quad (1)$$

式中：

- A_{532} ——样品在 532 nm 波长处的吸光度；
- A_{600} ——样品在 600 nm 波长处的吸光度；
- M ——丙二醛的摩尔吸光系数，155；
- M_r ——丙二醛的相对分子质量，72.06；
- m ——样品质量，g。

1.3.6 脂肪酸分析

参考张卓淮^[10]的方法，分别取 4.0 g 鱼体四个部位样品，加入 12 mL 氯仿 - 甲醇（2:1，V:V），在 10 000 r/min 下混合均质 1 min 静置 12 h，在 10 ℃ 下以 8 000 r/min 离心 15 min，取下层有机相氮吹至没有流动的脂质。加入 5 mL KOH- 甲醇溶液，在 65 ℃ 下水浴 20 min，震荡至油液消失后冷却。然后加入 2 mL 三氟化硼 - 甲醇溶液，65 ℃ 下水浴 5 min，冷却后加入 2 mL 正己烷，振摇后取上层加入 2 mL 饱和 NaCl 静置分层，取上层用无水硫酸钠脱水进行过滤后上机。使用配备有 HP-INNOWAX 色谱柱（60 m×0.25 mm×0.25 μm）的气相色谱法仪器测量脂肪酸成分，温度程序如下：初始温度为 140 ℃ 持续 0 min，然后以 4 ℃ /min 的速率升至 180 ℃，保持 5 min，然后以 10 ℃ /min 的速率升至 230 ℃，保持 25 min。进样体积为 1 μL，分流比为 10，流量为 2 mL/min。十一酸甲酯作为内标，检测器类型为火焰离子化检测器（FID）。

1.3.7 感官评价

将前处理好的鱼体四个部位样品分别称取 10.0 g 置于一次性杯中，由十位食品专业的人员依据评分标准表对样品气味的强弱由高至低进行评价打分。评分标准如表 1 所示。

表 1 斑点叉尾鲷的气味感官评价标准
Table 1 Criteria for smell sensory evaluation of *Ictalurus punctatus*

评分项目	分值
鱼腥味	0~9
油脂味	0~9
土霉味	0~9
水果味	0~9
蘑菇味	0~9

1.3.8 电子鼻气味分析

参考 Limbo 等^[11]方法利用电子鼻分析，分别准确称取 3.0 g 处理好的鱼体的四个部位样品置于 20 mL 顶空瓶中，密封后置于室温下平衡 30 min 采用手动顶空进样，载气为经活性炭过滤后的干燥空气，流量均为 350 mL/min；测量时间与清洗时间均为 120 s。

1.3.9 气相离子迁移谱（GC-IMS）分析

参考 Chen 等^[12]的方法，并稍加改动。分别准确称取 2.0 g 鱼体的四个部位样品放入 20 mL 顶空瓶中，密封后在 45 ℃ 下 500 r/min 振荡器中加热孵化 10 min，顶空进样口温度为 80 ℃，进样量为 0.5 mL，载气为高纯 N₂。气相色谱柱为 MXT-WAX（30 m×0.54 mm×1 μm），柱温为 40 ℃，运行时间 26 min，初流量为 2.0 mL/min，保持 3 min；然后 7 min 内线性升至 25 mL/min；再以 5 mL/min 升至 50 mL/min；10 mL/min 升至 150 mL/min。离子迁移谱检测温度为 45 ℃，漂移器为高纯 N₂，流量为 150 mL/min。

1.3.10 挥发性组成分析（GC-MS）

参考 Balcerzak 等^[13]的方法，分别准确称取 3.0 g 鱼体的四个部位样品，放入 20 mL 顶空瓶中，加入 6 mL 的饱和食盐水，密封后置于 60 ℃ 带有磁力搅拌器的水浴锅中加热平衡 10 min，再插入经 250 ℃ 老化 0.5 h 的 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头吸附 0.5 h 后，再迅速将萃取头插入 GC-MS 中，解析 5 min 后取出，样品重复实验三次。

1.3.10.1 色谱条件

气相色谱柱为 HP-INNOWAX（60 m×0.25 mm×0.25 μm），前进样口温度为 250 ℃，进样量为 1 μL，载气为高纯 He，流量为 1 mL/min。程序升温：柱箱初温为 45 ℃ 并保持 3 min；以 4 ℃ /min 升至 90 ℃，

保持 5 min；然后以 8 °C/min 升至 230 °C。

1.3.10.2 质谱条件

EI 源，电子能量为 70 eV，离子源温度 230 °C，传输线温度 250 °C，四极杆温度 150 °C，扫描范围 35~500 m/z 。

1.3.10.3 定性分析

样品中的挥发性组分经气相色谱-质谱进行解谱分析，NIST20.L 质谱库进行检索，结合保留时间与 C7-C40 正构烷烃标准品的质谱和保留时间进行比较，由公式 (2) 计算出样品中挥发性化合物的保留指数 RI 值，再结合文献报道中的保留指数对挥发性化合物进行对比鉴定。

$$RI = 100 \times \left(n + \frac{T_x - T_n}{T_{n+1} - T_n} \right) \quad (2)$$

式中：

T_x ——待测未知组分的保留时间；

n ——正构烷烃标准品的碳原子数；

$n+1$ ——正构烷烃标准品的碳原子数；其中 $n < X < n+1$ 。

1.3.11 气味活性值分析

气味活性值 (Odor Activity Value, OAV) 指嗅感物质的绝对浓度与其感觉气味阈值的比值^[14]。计算公式如式 (3) 所示：

$$OAV = \frac{C}{T} \quad (3)$$

式中：

C ——气味物质的浓度大小， $\mu\text{g/kg}$ ；

T ——气味物质的阈值， $\mu\text{g/kg}$ 。

1.4 数据处理

Origin 2024 软件绘制雷达图、柱状图和相关性热图；SPSS 24.0 软件进行显著性分析；利用 GC-IMS 系统自带的软件 Laboratory Analytical Viewer (LAV) 和 Library Search 进行挥发性化合物定性和指纹图谱分析；SIMCA 14.1 软件进行正交偏最小二乘判别分析；TBtools 绘制聚类热图。

2 结果与讨论

2.1 不同部位的基本理化成分分析

侧线鱼肉 (LM)、背侧线鱼肉 (DM)、腹侧鱼肉 (VM) 和鱼皮 (FS) 的基本营养成分、色泽以及氧化程度结果如表 2 所示。四个部位的水分含量 (70.35~72.21 g/100 g)、粗蛋白含量 (18.35~20.35 g/100 g)、粗脂肪含量 (7.75~9.86 g/100 g) 和灰分含量 (1.05~1.44 g/100 g) 均存在显著性差异 ($P < 0.05$)。VM 脂肪含量最大，其次是 DM 和 LM，

最后为 FS，分别为 9.86、7.75、7.66 和 7.38 g/100 g，明显高于常见的淡水鱼，如罗非鱼 (2.18 g/100 g)、草鱼 (6.03 g/100 g)^[15]、鲤鱼 (2.20 g/100 g) 和鲫鱼 (1.60 g/100 g)^[16]，表明斑点叉尾鲴具有较高的脂肪含量。封功能等^[17]研究也表明斑点叉尾鲴为高蛋白、高脂肪的淡水鱼类。LM 和 DM 中的水分及蛋白质含量最高，粗脂肪含量较高于 FS。在肌肉组织中，LM 白度最低，发红指数最大，含深色肌肉最多。

脂质氧化、微生物生长和白度与肌肉组织中血液和残留的血红蛋白有关^[18]。血红素蛋白具有加速过氧化物分解的能力，导致形成次级醛脂质氧化产物。Richards 等^[19]研究也表明血红蛋白是鱼类中脂质氧化的催化剂。LM 中血红蛋白浓度最高，达 1.24 mg/kg，红值 (a^*) 和发红指数 (a^*/b^*) 含量最大，白度最小。DM 和 VM 属于轻肌，黄度值高于 LM。这可能是由于白色肌肉和黄色肌肉之间血液残留不一致导致的^[20]。LM 中 TBA 含量最高，为 1.59 mg/kg，说明其脂肪氧化程度最大，而 VM 次之。与 Phetsang^[21]的研究结果相同，即 LM 的 TBA 值相对于其余部位，含量最大。FS 中 TBA 含量最少，为 0.90 mg/kg，这可能跟 FS 中含有的多肽具有较高的抗氧化活性有关^[22]。在四个部位中的血红蛋白含量和脂质氧化之间均呈现正相关的趋势。有研究也表明血红素蛋白在鱼腥味和鱼肌的氧化气味中起着至关重要的作用^[23]。

2.2 不同部位的脂肪酸分析

不同部位的脂肪酸组成及含量见表 3，FS 的饱和脂肪酸、单饱和脂肪酸和多饱和脂肪酸含量均为最高，其次为 VM，然后是 LM 和 DM。所有部位中棕榈酸是含量最大的饱和脂肪酸，占总饱和脂肪酸比例为 70% 左右。油酸在 FS 中的含量为 104.46 mg/g、VM 为 73.51 mg/g、LM 为 46.02 mg/g 以及 DM 为 35.36 mg/g，是单不饱和脂肪酸中最丰富的，也是含量最高的脂肪酸。油酸和亚油酸是斑点叉尾鲴中脂肪酸组成的优势成分，在每个部位中分均占总脂肪酸的 41.5% 和 22.5% 左右，对挥发性气味物质具有较大的影响。Phetsang 等^[2]在养殖杂交鲢鱼的不同部位中也发现油酸和亚油酸，分别占总脂肪酸的 40%~50% 和 15%~22%。如壬醛、辛醛和其他饱和醛是油酸和亚油酸的氧化产物。四个部位中都含有大量的多不饱和脂肪酸，且在各个部位中占比较大，均占总脂肪酸的 30% 左右，而多不饱和脂肪酸的氧化会产生各种醛类，如己醛、庚醛和辛醛产生清澈、果香和坚果香的气味，一些醛类也会产生难闻的气味，如鱼腥味、泥土味、木质味等^[3]。除了十七烯酸的含量在 LM、DM 和 VM 中不显著 ($P > 0.05$)，其余脂肪酸在四个部位均存在显著差异 ($P < 0.05$)。

表 2 斑点叉尾鲷不同部位的基本理化成分分析

Table 2 Physicochemical composition analysis of <i>Ictalurus punctatus</i> tissues					
参数		不同部位鱼体组织			
		LM	DM	VM	FS
基本营养成分	水分含量/(g/100 g)	71.81 ± 0.27 ^b	72.21 ± 0.36 ^a	70.35 ± 0.23 ^c	71.35 ± 0.41 ^b
	粗蛋白/(g/100 g)	20.35 ± 0.15 ^a	19.75 ± 0.22 ^c	18.35 ± 0.17 ^d	19.64 ± 0.15 ^b
	粗脂肪/(g/100 g)	7.66 ± 0.17 ^c	7.75 ± 0.21 ^b	9.86 ± 0.36 ^a	7.38 ± 0.22 ^c
	灰分/(g/100 g)	1.05 ± 0.06 ^d	1.12 ± 0.07 ^c	1.23 ± 0.10 ^b	1.44 ± 0.13 ^a
色差	<i>L</i> *	69.13 ± 0.67 ^a	68.82 ± 1.23 ^a	65.29 ± 1.17 ^b	63.16 ± 0.28 ^c
	<i>a</i> *	7.59 ± 0.40 ^a	5.49 ± 0.44 ^b	6.97 ± 0.16 ^a	0.65 ± 0.07 ^c
	<i>b</i> *	9.02 ± 0.38 ^a	9.08 ± 0.23 ^a	9.61 ± 0.18 ^a	4.56 ± 0.60 ^b
	白度	63.04 ± 0.88 ^b	66.95 ± 0.69 ^a	67.06 ± 1.29 ^a	63.08 ± 2.19 ^b
	发红指数 (<i>a</i> */ <i>b</i> *)	0.84 ± 0.02 ^a	0.60 ± 0.04 ^b	0.79 ± 0.06 ^a	0.14 ± 0.05 ^b
	血红蛋白/(mg/kg)	1.24 ± 0.06 ^a	1.05 ± 0.02 ^c	1.12 ± 0.03 ^b	0.17 ± 0.04 ^d
	TBA/(mg/kg)	1.59 ± 0.06 ^a	0.92 ± 0.08 ^c	1.20 ± 0.03 ^b	0.90 ± 0.03 ^c

注：同一行右肩不同的小写字母表示具有显著性差异（*P* < 0.05），下同。

表 3 斑点叉尾鲷不同部位的脂肪酸含量

Table 3 Fatty acid content of <i>Ictalurus punctatus</i> tissues						
序号	脂肪酸种类		脂肪酸含量/(mg/g)			
			LM	DM	VM	FS
1	十二烷酸	C12	0.05 ± 0.00 ^d	0.07 ± 0.00 ^c	0.13 ± 0.00 ^b	0.21 ± 0.00 ^a
2	肉豆蔻酸	C14	1.01 ± 0.01 ^c	0.72 ± 0.01 ^d	1.69 ± 0.02 ^b	2.58 ± 0.02 ^a
3	十五烷酸	C15	0.14 ± 0.00 ^c	0.14 ± 0.00 ^c	0.23 ± 0.00 ^b	0.34 ± 0.00 ^a
4	棕榈酸	C16	21.52 ± 0.30 ^c	15.95 ± 0.28 ^d	32.61 ± 0.55 ^b	45.95 ± 0.19 ^a
5	棕榈油酸	C16:1	2.69 ± 0.04 ^c	1.89 ± 0.03 ^d	4.29 ± 0.07 ^b	6.38 ± 0.04 ^a
6	十七烷酸	C17	0.26 ± 0.01 ^c	0.19 ± 0.00 ^d	0.44 ± 0.01 ^b	0.66 ± 0.02 ^a
7	十七烯酸	C17:1	0.38 ± 0.00 ^b	0.38 ± 0.00 ^b	0.40 ± 0.02 ^b	0.63 ± 0.03 ^a
8	硬脂酸	C18	6.86 ± 0.04 ^c	4.95 ± 0.20 ^d	11.10 ± 0.15 ^b	16.02 ± 0.05 ^a
9	反油酸	C18:1T	3.88 ± 0.21 ^c	2.96 ± 0.04 ^d	5.70 ± 0.08 ^b	7.19 ± 0.13 ^a
10	油酸	C18:1C	46.02 ± 0.70 ^c	35.36 ± 0.71 ^d	73.51 ± 1.16 ^b	104.46 ± 0.75 ^a
11	反亚油酸	C18:2T	26.04 ± 0.31 ^c	20.04 ± 0.42 ^d	41.04 ± 0.75 ^b	57.90 ± 0.28 ^a
12	亚油酸	C18:2C	0.78 ± 0.03 ^c	0.68 ± 0.01 ^d	1.13 ± 0.03 ^b	1.71 ± 0.01 ^a
13	γ-亚麻酸	C18:3N6	3.69 ± 0.05 ^c	2.78 ± 0.09 ^d	6.32 ± 0.09 ^b	9.13 ± 0.09 ^a
14	α-亚麻酸	C18:3N3	0.60 ± 0.01 ^c	0.56 ± 0.01 ^d	0.67 ± 0.01 ^b	1.00 ± 0.02 ^a
15	花生四烯酸	C20:0	2.33 ± 0.01 ^c	1.69 ± 0.03 ^d	3.93 ± 0.00 ^b	5.77 ± 0.06 ^a
16	花生一烯酸	C20:1	2.05 ± 0.06 ^c	1.48 ± 0.03 ^d	3.33 ± 0.05 ^b	4.80 ± 0.05 ^a
17	花生二烯酸	C20:2	1.04 ± 0.02 ^c	0.67 ± 0.02 ^d	1.40 ± 0.03 ^b	1.97 ± 0.01 ^a
18	花生三烯酸	C20:3N6	1.24 ± 0.05 ^c	1.06 ± 0.01 ^d	1.19 ± 0.00 ^b	1.46 ± 0.03 ^a
19	花生四烯酸	C20:4N6	0.05 ± 0.00 ^b	0.07 ± 0.00 ^c	0.13 ± 0.00 ^b	0.21 ± 0.00 ^a
	Σ SFA		30.44 ± 0.38 ^c	22.57 ± 0.48 ^d	46.87 ± 0.74 ^b	66.76 ± 0.30 ^a
	Σ n-9 MUFA		49.90 ± 0.90 ^c	38.32 ± 0.75 ^d	79.21 ± 1.24 ^b	111.65 ± 0.88 ^a
	Σ MUFA		55.30 ± 0.96 ^c	42.28 ± 0.75 ^d	87.84 ± 1.30 ^b	124.43 ± 0.82 ^a
	Σ n-6 PUFA		29.11 ± 0.36 ^c	22.45 ± 0.46 ^d	44.76 ± 0.81 ^b	63.04 ± 0.33 ^a
	Σ n-6 PUFA		3.69 ± 0.05 ^c	2.78 ± 0.90 ^d	6.32 ± 0.09 ^b	9.13 ± 0.09 ^a
	Σ PUFA		34.85 ± 0.47 ^c	26.72 ± 0.57 ^d	54.41 ± 0.94 ^b	76.97 ± 0.47 ^a
	Σ FA		120.59 ± 1.80 ^c	91.57 ± 1.80 ^d	189.12 ± 2.98 ^b	268.17 ± 1.59 ^a

2.3 不同部位的气味感官轮廓分析

气味轮廓评价的结果如图 2 所示，坐标轴上的数值代表分值大小。从图 2 可以看出，不同部位鱼体组织的鱼腥味最突出，其次为油脂味，然后是土霉味，含有少量的水果味和蘑菇味。FS 的鱼腥味最重，VM 的腥味程度仅次于 FS，但其油脂味在所有样品中最明显；DM 的油脂味、土霉味均比 LM 的要重，而 LM 的鱼腥味比 DM 更强烈。

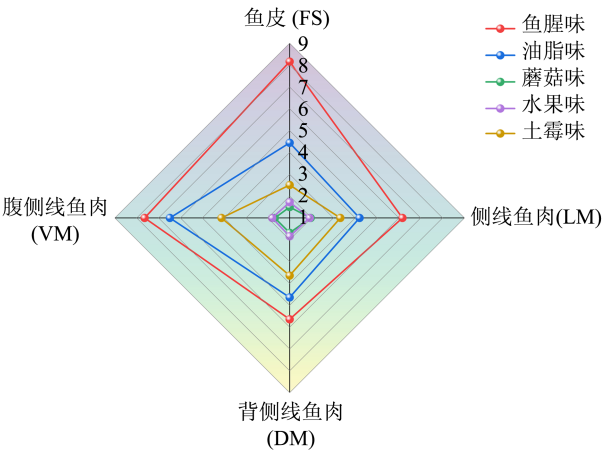


图 2 斑点叉尾鮰不同部位的气味感官轮廓
Fig.2 Sensory profile of the smell of *Ictalurus punctatus* tissues

2.4 不同部位电子鼻分析

不同部位的电子鼻传感器响应值雷达图如图 3 所示。当传感器的响应值大于 1 时，该响应值则具有研究意义^[24]。图 3 中各部位的鱼体组织传感器响应值均大于 1。不同部位鱼体组织的传感器响应值有一定的差异，W1S、W2S、W1W 和 W2W 的响应值在 10 个传感器中突出，其中 W1S 传感器响应值最高，说明对斑点叉尾鮰整体气味贡献最大的为甲基类化合物、醇醛酮类化合物、无机硫化物以及有机硫化物。其中，传感器 W2S 和 W1W 在 FS 上与 LM、DM、VM 的响应值有较大的差异，表明 W2S 和 W1W 对 FS 和鱼肉的挥发性气味可较好区分。其次四个部位在传感器 W2W、W3S、W1C、W5S、W3C、W6S、W5C 的响应值较为接近，表明所对应的整体挥发性气味物质较为相似。因此，可以得出：FS 的气味轮廓与其余三个部位组织有明显差异，各传感器响应值均是最大，而 LM、DM 和 VM 三个部位各个传感器的响应值相差不大，表明气味轮廓相似。Wang 等^[25]通过使用电子鼻分析草鱼中不同部位的气味，发现鱼皮和肌肉组织能被明显区分开，表明两者挥发性化合物存在一定的差异。由于电子鼻对于复杂的气味混合物以及低浓度的挥发性化合物辨识度不佳，无法具体到物质，可利用

专注于检测痕量化合物的 GC-IMS 进一步分析。

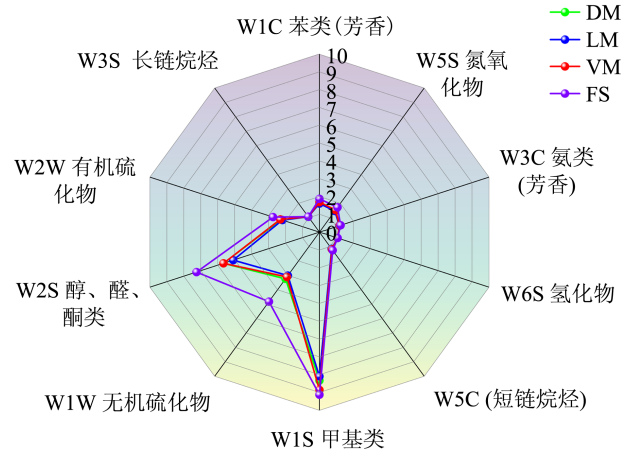


图 3 斑点叉尾鮰不同部位的气味传感器响应雷达图
Fig.3 Sensor response radar diagram of smell in *Ictalurus punctatus* tissues

2.5 不同部位GC-IMS分析

不同部位鱼体组织由于具有不同化学成分和脂质组成，会导致其具有不同的气味成分。采用 GC-IMS 对新鲜斑点叉尾鮰中四个部位的挥发性物质进行检测分析。将三维谱图通过降维处理得到如图 4 的 GC-IMS 二维谱图，图中的亮点代表四个部位样品的全部顶空成分。每一个亮点代表一种挥发性有机物，亮点越多，表明该鱼体组织的挥发性化合物种类越多，其中颜色由白色到红色，颜色越深代表物质含量越高，颜色越浅代表物质越低^[26]。从图 4 中可以直观地看出，不同鱼体组织的挥发性组分得到较好的分离，大多数峰信号出现保留时间为 0~1 000 s 和漂移时间为 1.0~2.0 s 的范围内。

利用 GC-IMS Library Search 插件与 LAV 软件对挥发性化合物进行二维定性，如图 5 可知，不同部位鱼体组织共计检出 46 种物质，初步定性出来的物质主要包括醛类 12 种、酮类 8 种、烷烃类和碳氢类各 5 种、酯类和烯类以及醇类各 4 种、含硫化合物和含氮化合物以及杂环类和呋喃类各 1 种。LM、DM、VM 和 FS 分别检出 42 种、32 种、38 种和 30 种化合物。共有的挥发性化合物组分主要有二甲基三硫醚、三甲胺、对甲苯、1-辛烯-3-醇、甲酸乙酯、2,5-二甲基呋喃、(Z)-2-丁醛、戊醛等。而某些醛类、醇类物质、含硫和含氮类物质会赋予鱼类不愉快气味，醇类物质主要赋予鱼体土腥味，醛类物质主要赋予草腥味，含氮类物质具有刺激性气味，类似于氨^[27]。其中，二甲基三硫醚主要是由蛋氨酸通过 Strecker 降解产生的具有鱼腥味和硫磺味的化合物^[27]。1-辛烯-3-醇具有蘑菇和

泥土味，是形成水产品腥味的主要挥发性化合物之一，三甲胺具有刺激性气味，类似于氨，具有明显的鱼腥 味^[27]。由于 GC-IMS 检测的只专注痕量挥发性化合物，且只能进行差异化分析，不能全成分定量分析斑点叉 尾鲷不同部位，因此需要结合 GC-MS 进行深入分析。

2.6 不同部位挥发性风味物质组成及含量

通过 SPME-GS-MS 分析鉴定新鲜斑点叉尾鲷中 四个部位的挥发性成分结果如表 4 所示，经 NIST 和 Wiley 质谱数据库检索，所有样品中最终共检出 44 种 挥发性物质，包括醛类 15 种、醇类 11 种、芳香类 7 种、

酮类 3 种、酯类 4 种、呋喃类和碳氢类以及萜类和酸 类分别各有 1 种。其中 FS 鉴定出 33 种、LM 有 28 种、 VM 有 25 种以及 DM 有 24 种，共有化合物有 22 种， 分别为 1-辛烯-3-醇、戊醛、己醛、庚醛、(E)-2-庚烯 醛、壬醛、(E)-2-辛烯醛等物质。挥发性化合物对水 产整体气味的贡献不仅取决于它们的浓度大小，还取 决于它们的气味阈值的高低^[28]。阈值越低，单位质量 的挥发性气味物质对样品气味的整体贡献就越大，而 OAV≥1 的化合物通常被认为对样品的整体气味有贡 献^[29]，表 5 为斑点叉尾鲷不同部位中挥发性化合物的 OAV 数据结果。

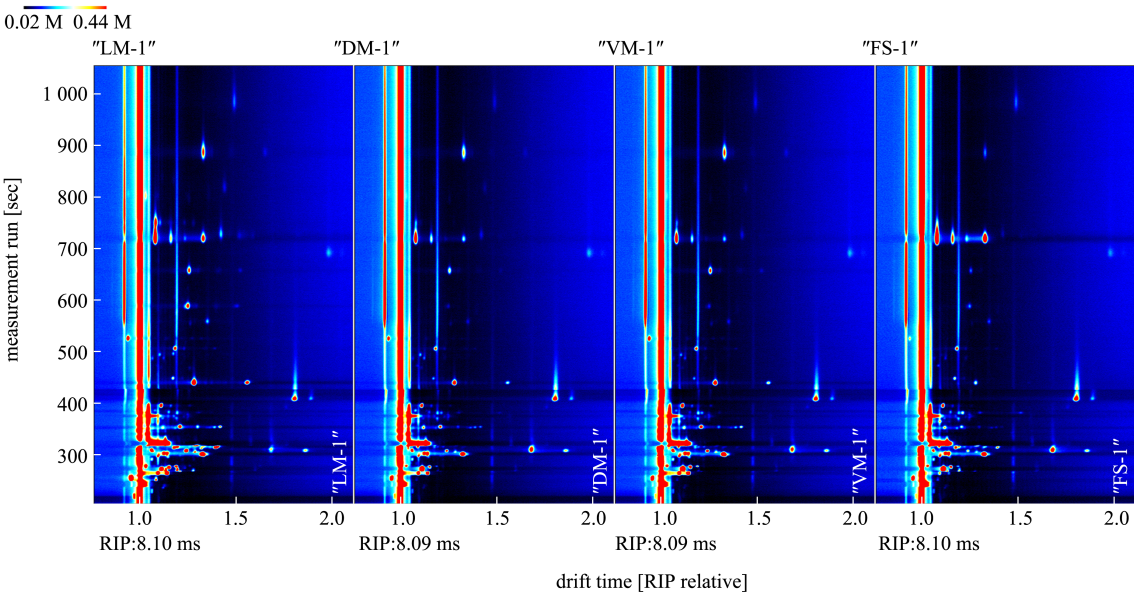


图 4 斑点叉尾鲷不同部位中挥发性成分的 GC-IMS 二维分析图谱

Fig.4 GC-IMS topographic plots of the volatile components of *Ictalurus punctatus* tissues

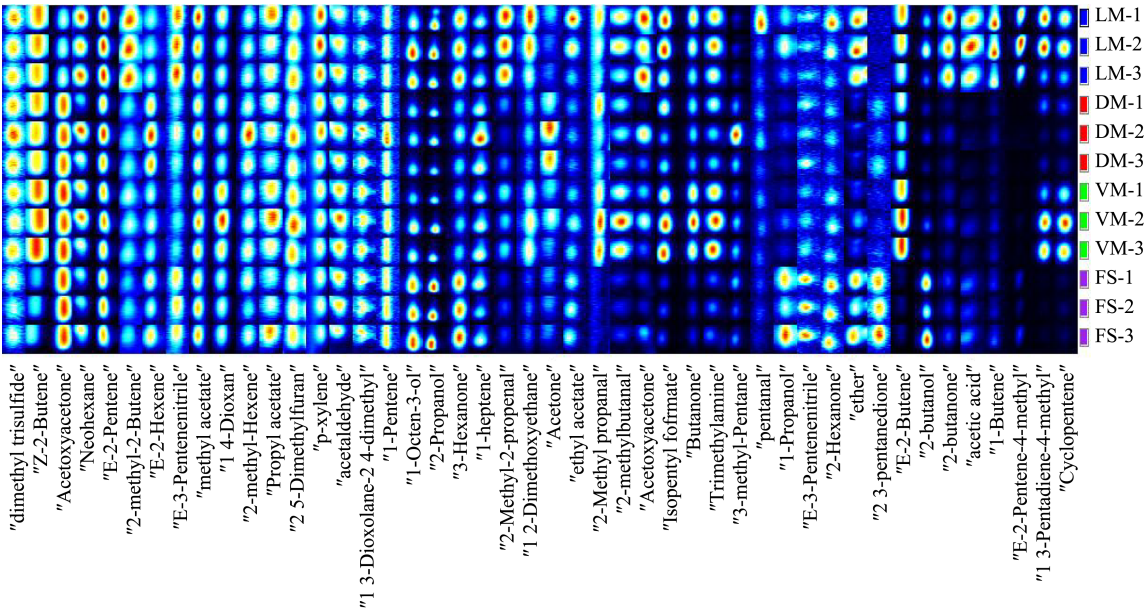


图 5 斑点叉尾鲷不同部位中的 GC-IMS gallery plot

Fig.5 GC-IMS gallery plot of *Ictalurus punctatus* tissues

以 44 种挥发性化合物作为因变量，不同部位作为自变量，通过图 6a 中的 OPLS-DA 分析，可以实现不同部位鱼体组织的有效区分。本次分析中的自变量拟合指数 (R_x^2) 为 0.938，因变量拟合指数 (R_y^2) 为 0.665，模型预测指数 (Q^2) 为 0.598， R^2 和 Q^2 都超过 0.5 表示模型拟合结果可接受^[30]。经过 200 次置换检验，如图 6b 中的判别分析图所示， Q^2 回归线与纵轴的相交点小于 0，说明模型不存在过拟合，模型验证有效，认为该结果可用于鉴别分析不同部位鱼体组织^[31]。同时根据挥发性化合物的各保留时间、信号强度两个参数建立斑点叉尾鲴各鱼体组织挥发性化合物的总离子

流图，如图 6c，不同鱼体组织挥发性化合物指纹图谱之间种类相似，但各类物质含量有差异。为了进一步可视化各挥发性化合物在各鱼体组织的差异，对挥发性化合物进行聚类热图分析，如图 6d，四个鱼体部位的挥发性化合物相互区分。在对比各挥发性化合物中对斑点叉尾鲴的气味贡献上，可以看出 VM 和 DM 聚为一类，说明这两个部位在挥发性化合物种类上相比于 FS 和 LM 更为接近，而在关于不同鱼体部位中挥发性化合物浓度上，鱼皮中大多数醛含量高于其余三个部位，LM 中的醇高于其余三个部位，VM 的挥发性化合物含量也较高于 DM。

表 4 斑点叉尾鲴不同部位中挥发性化合物的鉴定结果

Table 4 Identification results of volatile compounds in <i>Ictalurus punctatus</i> tissues								
序号	挥发性化合物	保留时间 /min	阈值 /(μg/kg)	RI	含量/(μg/kg)			
					LM	DM	VM	FS
1	桉叶油醇	16.91	1.1	1 201	1.13 ± 0.03 ^d	1.47 ± 0.01 ^c	1.71 ± 0.01 ^b	2.56 ± 0.03 ^a
2	正戊醇	18.82	150	1 266	2.93 ± 0.04 ^c	3.01 ± 0.02 ^b	3.71 ± 0.02 ^a	1.51 ± 0.02 ^d
3	正己醇	21.29	5.6	1 362	33.73 ± 0.07 ^a	29.27 ± 0.21 ^c	31.48 ± 0.06 ^b	15.39 ± 0.04 ^d
4	1-辛烯-3-醇	23.29	1	1 454	6.51 ± 0.25 ^b	4.41 ± 0.01 ^c	4.24 ± 0.01 ^c	8.81 ± 0.02 ^a
5	正庚醇	23.43	5.5	1 460	5.05 ± 0.02 ^a	3.11 ± 0.08 ^c	2.71 ± 0.00 ^d	4.52 ± 0.17 ^b
6	2-乙基己醇	24.07	25 480	1 486	1.27 ± 0.05 ^a	1.02 ± 0.00 ^b	1.26 ± 0.01 ^a	—
7	正辛醇	25.31	130	1 561	6.94 ± 0.61 ^b	4.19 ± 0.09 ^c	4.19 ± 0.23 ^c	11.7 ± 0.20 ^a
8	正壬醇	27.01	18	1 663	11.18 ± 0.17 ^a	6.40 ± 0.14 ^b	4.95 ± 0.03 ^c	10.8 ± 0.25 ^a
9	(Z)-3-壬醇	27.46	20	1 691	—	—	—	1.83 ± 0.01
10	土臭素	30.07	0.015	1 871	0.03 ± 0.00 ^c	0.04 ± 0.01 ^b	0.06 ± 0.00 ^a	—
11	十二醇	31.41	2 100	1 972	—	—	—	1.95 ± 0.05
醇类化合物					68.69 ± 1.50 ^a	52.92 ± 0.96 ^d	54.31 ± 1.43 ^c	59.07 ± 1.32 ^b
12	戊醛	9.58	20	984	1.95 ± 0.00 ^b	1.64 ± 0.02 ^c	2.52 ± 0.04 ^a	0.61 ± 0.02 ^d
13	己醛	12.90	5	1 086	8.57 ± 0.18 ^c	10.55 ± 0.02 ^b	14.44 ± 0.08 ^a	4.16 ± 0.06 ^d
14	庚醛	16.31	2.8	1 184	1.12 ± 0.07 ^c	1.14 ± 0.01 ^c	2.13 ± 0.12 ^b	2.52 ± 0.02 ^a
15	(E)-2-己烯醛	17.70	3.1	1 228	—	—	—	0.04 ± 0.01
16	2-己烯醛	17.76	0.85	1 230	0.70 ± 0.05 ^b	—	0.85 ± 0.01 ^a	—
17	正辛醛	19.49	0.7	1 289	2.14 ± 0.03 ^b	0.37 ± 0.01 ^d	1.40 ± 0.01 ^c	2.28 ± 0.01 ^a
18	(E)-2-庚烯醛	20.64	40	1 335	0.85 ± 0.07 ^a	0.63 ± 0.02 ^b	0.65 ± 0.06 ^b	0.40 ± 0.06 ^c
19	壬醛	22.1	1.1	1 396	18.70 ± 0.17 ^c	13.88 ± 0.13 ^d	20.34 ± 0.22 ^b	59.65 ± 0.10 ^a
20	(E)-2-辛烯醛	23.04	3	1 442	1.43 ± 0.04 ^a	0.85 ± 0.01 ^d	1.11 ± 0.06 ^c	1.56 ± 0.03 ^b
21	(E,E)-2,4-庚二烯醛	24.45	15	1 512	0.34 ± 0.01 ^a	0.23 ± 0.02 ^b	0.25 ± 0.02 ^b	—
22	(E)-2-壬烯醛	25.11	0.15	1 550	0.93 ± 0.14 ^b	0.48 ± 0.00 ^c	0.45 ± 0.00 ^c	1.13 ± 0.02 ^a
23	苯甲醛	25.16	750	1 552	1.81 ± 0.01 ^a	1.19 ± 0.01 ^c	1.6 ± 0.01 ^b	1.04 ± 0.05 ^d
24	苯乙醛	27.21	4	1 675	—	—	—	0.74 ± 0.01
25	(E,E)-2,4-壬二烯醛	27.99	0.2	1 726	0.22 ± 0.08	—	—	—
26	(E,E)-2,4-癸二烯醛	29.60	0.5	1 837	0.87 ± 0.02 ^a	0.46 ± 0.02 ^b	0.34 ± 0.02 ^c	—
醛类化合物					39.63 ± 0.98 ^c	31.42 ± 0.57 ^d	45.60 ± 1.03 ^b	74.13 ± 1.42 ^a

续表4

序号	挥发性化合物	保留时间 /min	阈值 /(μg/kg)	RI	含量/(μg/kg)			
					LM	DM	VM	FS
27	3- 辛酮	18.48	28	1 255	—	—	—	0.26 ± 0.04
28	2,3- 辛二酮	20.44	2.5	1 326	1.98 ± 0.03 ^c	2.2 ± 0.01 ^b	2.46 ± 0.01 ^a	0.46 ± 0.00 ^d
29	甲基庚烯酮	20.89	50	1 345	—	—	—	1.15 ± 0.05
酮类化合物					1.98 ± 0.23 ^c	2.20 ± 0.17 ^b	2.46 ± 0.19 ^a	1.87 ± 0.12 ^d
30	庚酸甲酯	19.34	/	1 284	—	—	—	1.90 ± 0.00
31	辛酸甲酯	21.92	/	1 388	—	—	—	2.28 ± 0.08
32	壬酸甲酯	24.07	/	1 492	—	—	—	8.46 ± 0.06
33	γ-壬酸内酯	32.75	/	2 078	—	—	—	5.30 ± 0.23
酯类化合物					—	—	—	17.9 ± 0.71
34	邻二甲苯	14.72	450	1 139	0.61 ± 0.00 ^c	0.61 ± 0.00 ^c	0.88 ± 0.03 ^b	1.15 ± 0.01 ^a
35	1-己基-3- 甲基苯	17.38	90	1 217	—	—	—	0.33 ± 0.02
36	对异丙基苯	18.74	5	1 264	—	—	—	1.21 ± 0.01
37	萘	28.88	60	1 786	1.92 ± 0.10 ^a	1.82 ± 0.12 ^a	1.93 ± 0.03 ^a	1.58 ± 0.01 ^b
38	对甲酚	30.86	1	1 930	3.41 ± 0.00 ^d	3.87 ± 0.05 ^c	4.64 ± 0.01 ^b	4.91 ± 0.18 ^a
39	苯酚	32.22	5500	2 035	—	—	—	0.55 ± 0.02
40	2,4-二叔丁基苯酚	36.02	500	2 258	8.23 ± 0.13 ^a	6.53 ± 0.04 ^b	3.59 ± 0.07 ^c	3.06 ± 0.02 ^d
芳香类化合物					14.17 ± 0.89 ^a	12.83 ± 0.54 ^b	11.04 ± 0.88 ^d	12.79 ± 0.76 ^c
41	2- 戊基呋喃	17.49	5.8	1 221	0.53 ± 0.01 ^c	0.49 ± 0.02 ^c	0.80 ± 0.04 ^b	1.26 ± 0.03 ^a
呋喃类化合物					0.53 ± 0.01 ^c	0.49 ± 0.02 ^c	0.80 ± 0.04 ^b	1.26 ± 0.03 ^a
42	苯乙烯	18.68	3.7	1 261	0.35 ± 0.04 ^b	—	—	0.92 ± 0.11 ^a
碳氢类化合物					0.35 ± 0.04 ^b	—	—	0.92 ± 0.11 ^a
43	长叶烯	25.73	/	1 585	—	—	—	1.65 ± 0.30
萜类化合物					—	—	—	1.65 ± 0.30
44	己酸	29.88	2.6	1 858	0.55 ± 0.16 ^a	0.31 ± 0.01 ^a	0.39 ± 0.03 ^a	—
酸类化合物					0.55 ± 0.16 ^a	0.31 ± 0.01 ^a	0.39 ± 0.03 ^a	—

注：“/”表示未查询到数据；“—”表示数据未测出。

醛类是脂质氧化降解及氨基酸 Strecker 反应的主要产物，支链短链醛和不饱和醛分别是由氨基酸的脱氨基和脂酸(亚油酸和亚麻酸)的降解生成的，具有清香、果香、坚果香及甜香，由于气味阈值较低，被认为是水产品重要的气味成分^[32]。大多数醛的气味与脂质的氧化程度有关，由脂肪氧化降解产生的醛大多具有甜的、草本的和脂肪的芳香香气，但随着脂肪氧化的程度加深，会逐渐形成令人不愉快的气味甚至是不良气味^[33]。从结果可以得出，四个不同部位中醛类化合物的种类最多，表明醛类化合物对斑点叉尾鲴的气味影响较大。FS 中醛类物质含量最大，为 74.13 μg/kg，VM 为 44.89 μg/kg，LM 为 39.63 μg/kg，DM 为 31.42 μg/kg。LM 的醛类物质的种类最多。四个部位鱼体组织共有的醛类物质为戊醛、己醛、庚醛、正辛

醛、(E)-2- 庚烯醛、壬醛等物质。其中壬醛在各个鱼体组织中含量最高，FS 中的含量高达 59.65 μg/kg，其次为 VM 含有 20.34 μg/kg，具有腥味、油脂味和干草味，由于阈值极低，其 OAV 值显著大于 1，对整体气味具有较大的贡献。壬醛是油酸的氧化产物，而脂肪酸数据中油酸的含量也最大，趋势一致。Schlüter 等^[34]研究表明淡水鱼中的鲤鱼(*Cyprinus carpio*)中的鱼腥味物质为(E)-2- 辛烯醛、(E)-2- 壬烯醛、己醛、(E,E)-2,4- 癸二烯醛以及庚烯醛。LM、DM 和 VM 中含有少量的(E,E)-2,4- 癸二烯醛，虽然含量低，但其阈值为 0.50 μg/kg，导致 OAV 大于 1，影响斑点叉尾鲴整体气味。LM 也鉴定到少量的(E,E)-2,4- 壬二烯醛，具有严重的脂肪氧化导致的油脂味^[35]。研究表明在醛类中，己醛是产生强烈鱼腥味的主要化合物，

庚醛也被认为是水产品风味降解的指标^[36]。VM 中己醛含量最大，达到 14.44 μg/kg，且其 OAV 值大于 1，对整体气味影响较大。来源于亚油酸的氧化降解苯甲醛带有鱼味和杏仁味。异味不仅是由一种特定的鱼腥物质引起的，而且是由几种物质的组合引起的，多种鱼腥物质共存会产生协同效应，显著加剧鱼腥味。

醇类挥发性化合物可以从脂氧合酶途径产生，还可来源于糖代谢或氨基酸 Ehrlich 机制的代谢^[37]。从表 4 可知，四个不同部位中共鉴定出桉叶油醇、正戊醇、正己醇、1-辛烯-3-醇、正庚醇、2-乙基己醇、正辛醇、正壬醇、(Z)-3-壬烯醇、土臭素和十二醇等 11 种醇类化合物，其中含量最高的为正己醇，其次正壬醇，正辛醇及 1-辛烯-3-醇等。LM 中醇类物质占比最大，其次是 FS、VM 和 DM。由于大部分饱和醇类气味阈值较高，如正庚醇（辛辣味）、正戊醇（果香味）对新鲜斑点叉尾鲴气味的贡献较小；少部分饱和醇的气味阈值相对较低，如正己醇（果香）和 1-辛烯-3-醇（蘑菇味及鱼腥味），影响新鲜斑点叉尾鲴的整体气味。结合表 5 中可知，OAV 值大于 1 的醇类物质有正己醇、桉叶醇、1-辛烯-3-醇以及土臭素。LM 中正己醇含量最大，其次是 VM 和 DM，FS 含量最小，因此鱼肉部分相对于 FS 有果香味。正己醇一般被认为与淡水鱼的新鲜气味有关^[38]。FS 中的桉叶油醇、1-辛烯-3-醇含量最大，桉叶油醇具有薄荷香气，而 1-辛烯-3-醇具有蘑菇味及鱼腥味，这与感官评价中 FS 相对于其余三个部位的腥味更重的结果相同。有文献报道，水产品的泥土和蘑菇气味被认为是由 1-辛烯-3-醇引起的，同时也是评估水产脂质氧化的潜在标志物^[39]。土臭素是具有强烈的土腥味，其阈值极低，在 LM、DM 和 VM 三个部位中均检测出土臭素，其中 VM 含量最大，其次是 DM 和 LM。这可能是由于各个部位脂肪含量不一致导致的，因为土臭素是脂溶性的^[40]。也有研究指出斑点叉尾鲴的异味问题主要是由 2-甲基异冰片和土臭素引起的，它们与泥土味、霉味和泥泞的异味有关^[41]。

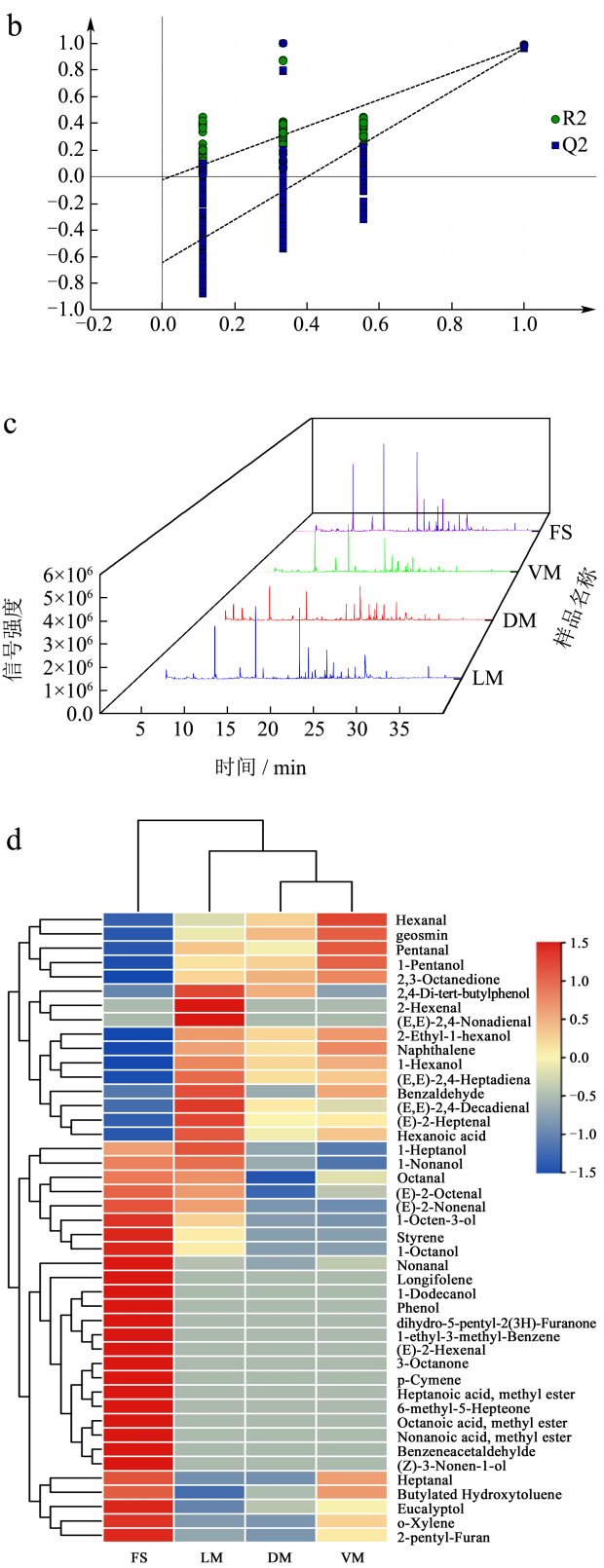
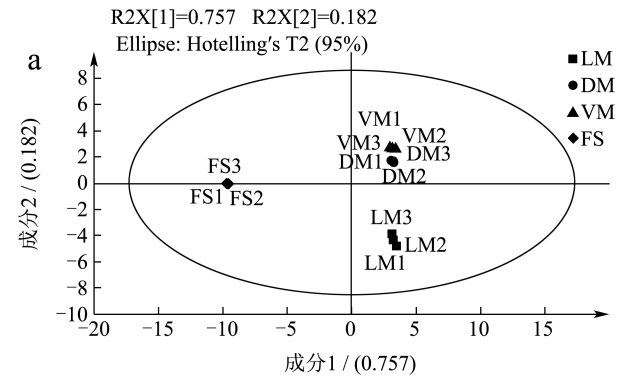


图 6 斑点叉尾鲴不同部位中挥发性化合物的 OPLS-DA (a)、判别分析图 (b)、总离子流图 (c) 及聚类热图 (d)

Fig.6 OPLS-DA (a), discriminant plot (b), total ion flow diagram (c) and cluster heatmap (d) of the volatile components of *Ictalurus punctatus* tissues

表 5 斑点叉尾鲷不同部位中挥发性化合物的气味活性值
Table 5 The odor activity of volatile compounds in *Ictalurus punctatus* tissues

序号	挥发性化合物	阈值 /(μg/kg)	气味	RI	OAVs			
					LM	DM	VM	FS
1	己醛	5	青草味、腐臭	1 086	1.71 ± 0.04 ^c	2.11 ± 0.00 ^b	2.90 ± 0.00 ^a	0.83 ± 0.01 ^d
2	桉叶油醇	1.1	薄荷、葱味	1 201	1.03 ± 0.03 ^d	1.33 ± 0.01 ^c	1.55 ± 0.00 ^b	2.33 ± 0.03 ^a
3	正辛醛	0.7	清香、果香	1 289	3.06 ± 0.04 ^b	0.52 ± 0.04 ^d	2.01 ± 0.00 ^c	3.26 ± 0.02 ^a
4	正己醇	5.6	果香	1 362	6.02 ± 0.01 ^a	5.23 ± 0.04 ^c	5.61 ± 0.00 ^b	2.75 ± 0.01 ^d
5	壬醛	1.1	脂肪味	1 396	17.00 ± 0.15 ^c	12.62 ± 0.12 ^d	18.63 ± 0.00 ^b	54.23 ± 0.09 ^a
6	1-辛烯-3-醇	1	蘑菇味、土腥味	1 454	6.51 ± 0.25 ^b	4.41 ± 0.01 ^c	4.23 ± 0.00 ^c	8.81 ± 0.02 ^a
7	(E)-2-壬烯醛	0.15	坚果味	1 550	6.18 ± 0.94 ^b	3.18 ± 0.03 ^c	3.00 ± 0.00 ^c	7.55 ± 0.12 ^a
8	(E,E)-2,4-壬二烯醛	0.2	脂肪味、青草味	1 726	1.12 ± 0.38	—	—	—
9	(E,E)-2,4-癸二烯醛	0.5	脂肪味、鱼腥味	1 837	1.75 ± 0.04 ^a	0.92 ± 0.03 ^b	0.72 ± 0.00 ^c	—
10	土臭素	0.015	土腥味	1 871	1.97 ± 0.23 ^c	2.83 ± 0.36 ^b	3.87 ± 0.05 ^a	—
11	对甲酚	1	酸笋味	1 930	3.41 ± 0.00 ^b	3.87 ± 0.05 ^b	4.65 ± 0.00 ^a	4.91 ± 0.18 ^a

酮类化合物通常具有甜美和水果味。四个不同部位鱼体组织中共有的酮类化合物为 2,3-辛二酮，具有奶香气味，VM 中含量最大。FS 中检测出 3-辛酮和甲基庚烯酮，均呈现果香味。酯类化合物是醇与羧酸通过酯化产生的。多数酯类也具有果香味，四个部位中仅有 FS 中检测出酯类物质，共 4 种，分别为庚酸甲酯、辛酸甲酯、壬酸甲酯和 γ-壬酸内酯，这几种物质的 OAV 值均小于 1，在整体气味上贡献很小。从样品中还鉴定出芳香族化合物，但多数挥发性化合物具有较高的气味阈值，如甲苯、4-二叔丁基苯酚以及邻二甲苯，在较低浓度下对整体气味的贡献较小，但少数酚类挥发性化合物也具有较低的气味阈值，如各部位均检测到的对甲酚，具有刺激性的酸笋气味。四个部位均检测出 2-戊基呋喃，是加热过程中从亚油酸中衍生的非羧基化合物，具有水果味和黄油味。在 FS 中还鉴定出长叶烯（木香）和苯乙烯（清新、甜味）两种化合物。LM、DM、VM 中均检测出己酸，具有强烈的脂肪臭气味。生活的水环境也影响着斑点叉尾鲷的气味，四个部位均检测到萘，这可能是被环境污染，使鱼具有难闻的味道^[42]。

综上所述，LM、DM、VM 和 FS 的挥发性种类及其含量存在差异。关键性挥发性气味物质中壬醛含量最大，这也表明其对斑点叉尾鲷的整体气味贡献最大，而鱼皮中壬醛的含量也最大，其腥味值也最强烈。鱼

肉中正己醇含量显著大于 FS，这也导致鱼肉呈现一定的果香气味。由于 VM 脂肪含量最高，易氧化，而由脂肪氧化导致的壬醛、己醛、1-辛烯-3-醇与土臭素共存时会加剧鱼体的腥味及脂肪味。LM 中的血红蛋白含量最大，能促进了挥发性脂质氧化产物的产生，导致检测出具有严重脂肪味的 2,4-壬二烯醛。DM 具有最少的脂质氧化量，产生最少量的挥发性风味物质。

2.7 斑点叉尾鲷脂肪酸、脂肪含量和关键性挥发性化合物之间的相关性分析

脂质氧化、蛋白质降解和微生物作用对淡水鱼的挥发性化合物起着至关重要的作用。如图 7 可以看出，斑点叉尾鲷中的大部分关键挥发性气味与脂肪酸和脂肪含量相关。大部分斑点叉尾鲷的都存在泥土、泥泞的气味，而这也被证明与 2-MIB 和土臭素相关，均属于亲脂性化合物，关键性挥发性化合物中的土臭素跟脂肪也表现出显著的负相关，说明其受脂肪含量影响。有研究表明 (E)-2-壬烯醛和 1-辛烯-3-醇也呈现一定的泥土味^[43]，与脂肪含量也呈显著负相关，是斑点叉尾鲷的关键挥发性化合物，进而加剧鱼体中的泥土气味。桉叶醇、正辛醛、壬醛、(E,E)-2,4 癸二烯醛以及对甲酚与脂肪酸呈现正相关，说明脂肪酸含量影响斑点叉尾鲷的整体气味。因此，脂肪酸含量、脂肪含量与斑点叉尾鲷关键挥发性气味物质有关，影响鱼体的整体气味。

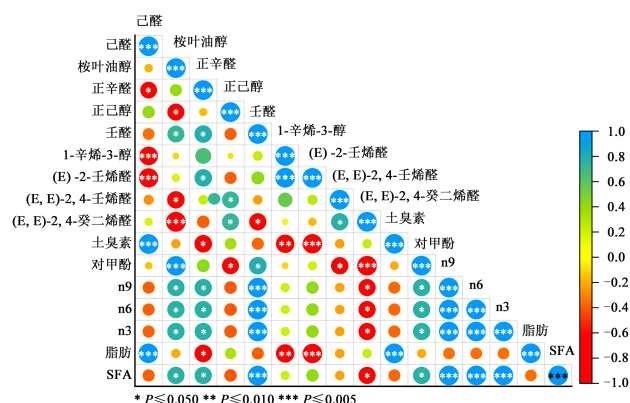


图7 斑点叉尾鲟不同部位中脂肪酸、脂肪和关键性挥发性化合物的相关性分析

Fig.7 Correlation analysis between potent volatile compounds and fatty acids or fat of *Ictalurus punctatus* tissues

3 结论

本研究对新鲜斑点叉尾鲟不同部位化学特性和挥发性化合物进行比较分析, 结果表明各部位的血红蛋白、脂肪酸、TBA 以及挥发性化合物含量均有所不同。其中血红蛋白是其早期自氧化的启动剂, 促进了挥发性脂质氧化产物的生成, LM 血红蛋白含量最高, 达到 1.24 mg/kg, 导致其最易发生脂质氧化; 除十七烯酸外, 四个部位中不同脂肪酸含量均存在明显的差异 ($P < 0.05$), FS 中各脂肪酸含量均为最高, 脂肪酸总含量达到 268.17 mg/g, 其次为 VM, 然后是 LM 和 DM; 气味感官评价得出腥物质是四个部位最突出的气味特征, 其次为油脂味和土霉味, FS 的腥味最大, VM 和 DM 的油脂味及土霉味最重; 电子鼻测定结果表明甲基类、醇醛酮类、无机硫化物和有机硫化物为斑点叉尾鲟的主要气味物质, FS 的气味轮廓与其余三个部位组织存在显著差异, LM、DM 及 DM 气味轮廓存在相似; GC-IMS 的二维和指纹图谱均表明四个部位的挥发性化合物种类和含量不一致; GC-MS 表明斑点叉尾鲟的挥发性化合物主要为醇、醛、酮及芳香类等物质, FS 所鉴定出挥发性化合物种类最多; 四个部位中 OAV 含量最高的壬醛、1-辛烯-3-醇、(E)-2-壬烯醛、土臭素及对甲酚等多具有令人不适的脂肪气味和腥味, 正己醇和正辛醛具有新鲜鱼所带的清香气味, FS 中关键挥发性化合物种类虽少于其余部位, 但具有特殊异味的物质 OAV 均最大, 异味在感官评价中也最强烈, LM 中各物质含量与 DM 和 VM 也存在显著差异 ($P < 0.05$), 另外, 含有强烈土腥味的土臭素存在于鱼肉中, VM 和 DM 中的 OAV 含量显著高于 LM ($P < 0.05$); 斑点叉尾鲟中的关键挥发性化合物以醇醛为主, 且与脂肪酸和脂肪含量相关。本文旨在深入

开展斑点叉尾鲟各鱼体组织的气味轮廓研究, 促进其原料深加工与品质提升奠定理论基础。此外, 可能存在部分关键微量易挥发成分未达到检测下限, 不能更全面探究新鲜斑点叉尾鲟各部位的气味特征, 后续可通过在提取方式上采用溶剂辅助风味萃取 (SAFE) 进行比较分析。

参考文献

- [1] 农业农村部渔业渔政管理局. 中国渔业统计年鉴[Z]. 北京: 中国农业出版社, 2024.
- [2] PHETSANG H E A, PANPIPAT W, PANYA A, et al. Chemical characteristics and volatile compounds profiles in different muscle part of the farmed hybrid catfish (*Clarias macrocephalus* × *Clarias gariepinus*) [J]. International Journal of Food Science & Technology, 2022, 57(1): 310-322.
- [3] CHENG H, WANG J, XIE J. Progress on odor deterioration of aquatic products: Characteristic volatile compounds, analysis methods, and formation mechanisms [J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102666.
- [4] UNDELAND I. Oxidative stability of seafood [M]. London, UK: AOCS Press, 2016.
- [5] PERCIVAL S, DRABSCH P, GLENCROSS B. Determining factors affecting muddy-flavour taint in farmed barramundi, *Lates calcarifer* [J]. Aquaculture, 2008, 284(1-4): 136-143.
- [6] SVEINSDÓTTIR H I, SVERRISDÓTTIR S B, KARLSDÓTTIR M G, et al. Effects of anatomical variation of muscle on composition and oxidation susceptibility of Atlantic mackerel (*Scomber scombrus*) [J]. LWT, 2021, 146: 111431.
- [7] SOHN J H, TAKI Y, USHIO H, et al. Lipid oxidations in ordinary and dark muscles of fish: influences on rancid off-odor development and color darkening of yellowtail flesh during ice storage [J]. Journal of Food Science, 2005, 70(7): s490-s496.
- [8] CHAIJAN M, UNDELAND I. Development of a new method for determination of total haem protein in fish muscle [J]. Food Chemistry, 2015, 173: 1133-1141.
- [9] 宣晓婷, 陈思媛, 乐耀元, 等. 高水分南美白对虾干货架期预测模型的构建[J]. 农产品加工(上半月), 2022, 10: 78-82.90.
- [10] 张卓淮. 烟熏鲟鱼加工工艺研究[D]. 杭州: 浙江工商大学, 2020.
- [11] LIMBO S, TORRI L, SINELLI N, et al. Evaluation and predictive modeling of shelf life of minced beef stored in high-oxygen modified atmosphere packaging at different temperatures [J]. Meat Science, 2010, 84(1): 129-136.
- [12] CHEN K, YANG X, HUANG Z, et al. Modification of gelatin hydrolysates from grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) scales by Maillard reaction: Antioxidant activity and volatile compounds [J]. Food Chemistry, 2019, 295: 569-578.
- [13] BALCERZAK L, GIBKA J, SIKORA M, et al. Minor constituents of essential oils and aromatic extracts. Oximes derived from natural flavor and fragrance raw materials-Sensory evaluation, spectral and gas chromatographic characteristics [J]. Food Chemistry, 2019, 301: 125283.
- [14] 杨姣, 安玥琦, 陈雨欣, 等. 鱼糜制品加热过程中过熟味的特征风味成分解析[J]. 现代食品科技, 2020, 36(8): 265-280.

- [15] 魏建华.壳聚糖对草鱼肌肉营养成分的影响[J].江西水产科技,2024,5:31-33.
- [16] 贾成霞,杨慕,胡庆杰,等.6种野生鱼肌肉营养成分分析与评价[J].现代食品科技,2023,39(6):27-36.
- [17] 封功能,张雪梅,刘汉文,等.斑点叉尾鮰含肉率及肌肉营养成分分析[J].江西农业学报,2007,19(7):79-80,83.
- [18] LEI X, QIN Z, YE B, et al. Interaction between secondary lipid oxidation products and hemoglobin with multi-spectroscopic techniques and docking studies [J]. Food Chem, 2022, 394: 133497.
- [19] RICHARDS M P, MODRA A M, LI R. Role of deoxyhemoglobin in lipid oxidation of washed cod muscle mediated by trout, poultry and beef hemoglobins [J]. Meat Sci, 2002, 62(2): 157-163.
- [20] CHAIJIAN M, BENJAKUL S, VISESSANGUAN W, et al. Changes of pigments and color in sardine (*Sardinella gibbosa*) and mackerel (*Rastrelliger kanagurta*) muscle during iced storage [J]. Food Chemistry, 2005, 93(4): 607-617.
- [21] PHETSANG H, PANIPAT W, PANYA A, et al. Occurrence and development of off-odor compounds in farmed hybrid catfish (*Clarias macrocephalus* × *Clarias gariepinus*) muscle during refrigerated storage: chemical and volatilomic analysis [J]. Foods, 2021, 10(8): 1841.
- [22] WANG Y, WANG C, WANG S, et al. Physicochemical properties and antioxidant activities of tree peony (*Paeonia suffruticosa* Andr.) seed protein hydrolysates obtained with different proteases [J]. Food Chemistry, 2021, 345: 128765.
- [23] THIANSILAKUL Y, BENJAKUL S, RICHARDS M P. Effect of myoglobin from eastern little tuna muscle on lipid oxidation of washed asian seabass mince at different pH conditions[J]. Journal of Food Science, 2011, 76(2): 242-249.
- [24] GONG H, YANG Z, LIU M, et al. Time-dependent categorization of volatile aroma compound formation in stewed Chinese spicy beef using electron nose profile coupled with thermal desorption GC-MS detection [J]. Food Science and Human Wellness, 2017, 6(3): 137-146.
- [25] WANG H, ZHANG J, ZHU Y, et al. Volatile components present in different parts of grass carp [J]. Journal of Food Biochemistry, 2018, 42(6): e12668.
- [26] YAO W, CAI Y, LIU D, et al. Comparative analysis of characteristic volatile compounds in Chinese traditional smoked chicken (specialty poultry products) from different regions by headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Poult Sci, 2020, 99(12): 7192-7201.
- [27] DAI W, HE S, HUANG L, et al. Strategies to reduce fishy odor in aquatic products: Focusing on formation mechanism and mitigation means [J]. Food Chem, 2024, 444: 138625.
- [28] ZHANG H, HUANG D, PU D, et al. Multivariate relationships among sensory attributes and volatile components in commercial dry porcini mushrooms (*Boletus edulis*) [J]. Food Research International, 2020, 133: 109112.
- [29] 庞一扬.阳朔啤酒鱼风味及风味改良即食啤酒鱼工艺研究[D].南宁:广西大学,2021.
- [30] YUN J, CUI C, ZHANG S, et al. Use of headspace GC-MS combined with chemometric analysis to identify the geographic origins of black tea [J]. Food Chemistry, 2021, 360: 130033.
- [31] 付志昂, 欧阳单华, 杨杰, 等. 新疆不同地区马乳中挥发性风味物质差异分析[J].现代食品科技,2025,41(7):29-39.
- [32] ZHOU X, CHONG Y, DING Y, et al. Determination of the effects of different washing processes on aroma characteristics in silver carp mince by MMSE-GC-MS, e-nose and sensory evaluation [J]. Food Chemistry, 2016, 207: 205-213.
- [33] VARLET V, PROST C, SEROT T. Volatile aldehydes in smoked fish: Analysis methods, occurrence and mechanisms of formation [J]. Food Chemistry, 2007, 105(4): 1536-1556.
- [34] SCHLÜTER S, STEINHART H, SCHWARZ F J, et al. Changes in the odorants of boiled carp fillet (*Cyprinus carpio* L.) as affected by increasing methionine levels in feed [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1999, 47(12): 5146-5150.
- [35] WAN P, LIU J, CHEN D. Analysis of aroma-active compounds in bighead carp head soup and their influence on umami of a model soup [J]. Microchemical Journal, 2021, 168: 106436.
- [36] GUAN W, REN X, LI Y, et al. The beneficial effects of grape seed, sage and oregano extracts on the quality and volatile flavor component of hairtail fish balls during cold storage at 4 °C [J]. LWT, 2019, 101: 25-31.
- [37] WEN X, CHEN A, XU Y, et al. Comparative evaluation of volatile profiles of asian hard clams (*Meretrix meretrix*) with different shell colors by electronic nose and GC-MS [J]. Journal of Aquatic Food Product Technology, 2021, 30(1): 107-121.
- [38] JOSEPHSON D B, LINDSAY R C, STUIBER D A. Biogenesis of lipid-derived volatile aroma compounds in the emerald shiner (*Notropis atherinoides*) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1984, 32(6): 1347-1352.
- [39] WANG F, GAO Y, WANG H, et al. Analysis of volatile compounds and flavor fingerprint in Jingyuan lamb of different ages using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. Meat Science, 2021, 175: 108449.
- [40] BROWN T M, CERRUTO-NOYA C A, SCHRADER K K, et al. Evaluation of a modified pH-shift process to reduce 2-methylisoborneol and geosmin in spiked catfish and produce a consumer acceptable fried catfish nugget-like product [J]. J Food Sci, 2012, 77(10): S377-S383.
- [41] TUCKER C S, SCHRADER K K. Off-flavors in pond-grown ictalurid catfish: Causes and management options [J]. Journal of the World Aquaculture Society, 2020, 51(1): 7-92.
- [42] WANG H, ZHU Y, ZHANG J, et al. Characteristic volatile compounds in different parts of grass carp by comprehensive two-dimensional gas chromatography-time-of-flight mass spectrometry [J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23(1): 777-796.
- [43] MAHMOUD M A A, BUETTNER A. Characterisation of aroma-active and off-odour compounds in German rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Part II: Case of fish meat and skin from earthen-ponds farming [J]. Food Chemistry, 2017, 232: 841-849.