

Jin Q, Chen Z, Wang D G, *et al.* Comparison on muscle flavour quality and metabolomics of pengze crucian carp (*Carassius auratus* var. Pengze) under pond and land-based round pond culture modes [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2026, 50(1): 012602. [靳全, 陈政, 王冬根, 等. 池塘养殖和陆基圆池养殖模式下彭泽鲫肌肉风味品质及代谢组学比较 [J]. 水生生物学报, 2026, 50(1): 012602.]

池塘养殖和陆基圆池养殖模式下彭泽鲫肌肉风味品质及代谢组学比较

靳全^{1,2*} 陈政^{1*} 王冬根¹ 余应梅¹ 严寒¹ 邵珊珊¹ 黄正花¹
魏益华¹ 康浩^{1,2} 李思明^{1#} 黎德兵^{2#}

(1. 江西省农业科学院农产品质量安全与标准研究所, 南昌 330200; 2. 四川农业大学动物科技学院, 成都 611130)

摘要: 研究旨在分析比较池塘养殖和陆基圆池养殖模式下彭泽鲫(*Carassius auratus* var. Pengze)肌肉风味品质的差异, 并通过代谢组学初步探究其形成原因。结果表明: 与陆基圆池组比较, 池塘养殖水域中总磷、氨氮、总氮水平显著降低($P<0.05$); 肌肉中多不饱和脂肪酸特别是亚油酸相对含量显著增高($P<0.05$), 但单不饱和脂肪酸特别是油酸相对含量显著降低($P<0.05$); 鲜味物质肌苷酸与鸟苷酸含量均较高, 但组间差异不显著($P>0.05$); 通过GC-MS (气相色谱质谱联用仪)在两种养殖模式鱼中共鉴定出141种挥发性物质, 并根据表达丰度将14种差异挥发性物质作为鉴别两种养殖模式下彭泽鲫肌肉的特征风味物质, 其中10种物质在陆基圆池中表达显著上调($P<0.05$), 这些差异物质为奶香、果香味物质以及高感官阈值的酸类异味物质; 挥发性物质的总丰度显著减小($P<0.05$), 同时电子鼻传感器的响应值也显著降低, 表明陆基圆池养殖模式可能促进了彭泽鲫肌肉中挥发性物质的积累或生成。代谢组学分析发现, 在两种养殖模式下彭泽鲫肌肉存在312种差异代谢物, 其中陆基圆池养殖鱼相较于池塘养殖鱼有181种代谢物表达上调, 只有131种表达下调, 使鱼肉拥有更多的风味前体物质; 进一步对差异代谢物进行KEGG通路富集分析, 发现类固醇激素生物合成通路和花生四烯酸代谢通路是两种养殖模式间的主要差异代谢通路。上述结果表明: 养殖环境诸多因素通过花生四烯酸代谢和类固醇激素合成等通路, 改变了鱼肉中脂肪酸组成和代谢物的沉积, 诱导了两种养殖模式鱼差异挥发性风味物质形成。

关键词: 养殖模式; 彭泽鲫; 肌肉; 风味物质; 代谢组学

中图分类号: S965.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-3207(2026)01-012602-12

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2025.0112 CSTR: 32229.14.SSSWXB.2025.0112



彭泽鲫(*Carassius auratus* var. Pengze)原产于江西省九江市彭泽县, 被列为国家地理标志保护产品, 该品种具有营养丰富、生长快、抗病能力强等优良特性^[1,2], 曾被农业部遴选为全国重点推广的五大淡水经济鱼类之一。目前, 彭泽鲫的养殖主要采用池塘养殖模式, 该模式虽然具有集约化程度高、初始投资成本低等优势, 但也面临着显著的生态挑战, 包括水资源利用率低、养殖废水排放造成的环境污染, 以及由此引发的周边水体富营养化等问

题^[3]。陆基圆池循环水养殖作为一种新型生态养殖模式, 具有水质调控便捷、投喂管理高效等技术优势。该模式不仅能够有效降低水产养殖对生态环境的负面影响, 还为水产养殖业的可持续发展提供了可行路径。目前, 这一养殖模式已在黄金鲫^[4]、罗非鱼^[5]等多个鱼类品种中成功实现规模化应用。

养殖模式的环境条件差异会对鱼肉风味品质产生影响。与传统池塘养殖相比, 循环水养殖模式下的大口黑鲈肌肉组织中呈现出更为丰富的甜味

收稿日期: 2024-04-03; 修订日期: 2025-08-11

基金项目: 国家大宗淡水鱼产业技术体系(CARS-45-42); 江西现代农业科研协同创新专项项目(JXXTKYTJTS202505)资助 [Supported by the China Agriculture Research System (CARS-45-42); the Jiangxi Special Project for Collaborative Innovation in Modern Agricultural Research (JXXTKYTJTS202505)]

作者简介: 靳全(1998—), 男, 硕士研究生; 主要从事鱼类营养研究。E-mail: 2321721028@qq.com 陈政(1997—), 男, 博士; 主要从事鱼类营养品质研究。E-mail: pufferfish@163.com *共同第一作者

通信作者: 李思明(1976—), E-mail: Lisiming16@126.com 黎德兵(1973—), E-mail: Ldb73260512@163.com #共同通信作者

物质和植物性芳香成分, 其整体风味品质显著优于池塘养殖模式^[6]。在低盐养殖环境中草鱼肌肉中蛋白质、脂肪、必需氨基酸和多不饱和脂肪酸都显著高于淡水养殖环境, 同时异味物质显著降低, 营养和风味品质得到改善^[7]。风味物质是风味前体物质经过脂质氧化等产生醛类、醇类、酮类、烃类、酯类、醚类、呋喃类和含氮含硫化合物^[8]等挥发性化合物的总称, 其组成和含量直接影响风味形成从而影响养殖和消费的全过程^[9]。然而, 目前关于彭泽鲫风味特征还有待探究, 同时陆基桶相较池塘对彭泽鲫风味品质的作用也未知, 因此系统开展陆基圆池养殖模式和池塘养殖模式对其肌肉风味影响的比较研究, 对优化彭泽鲫养殖模式、提升其肌肉品质具有重要的理论指导意义和实践价值。

鱼肉中风味物质是由风味前体物质经过一系列反应而来, 但具体机理还有待研究, 通过代谢组学能够为了解风味前体物质形成风味物质的分子机制提供数据支持, 同时代谢组学技术的应用能够有效鉴定和筛选肌肉组织中的特征性差异代谢物, 进而解析调控风味物质形成的关键代谢通路, 为阐明肌肉品质风味差异的形成机制提供了重要的理论依据。在高微囊藻毒素-LR浓度环境中生长的罗非鱼比正常水环境养殖鱼肌肉中代谢物L-肉碱和L-乙酰肉碱的含量显著增加, 有助于鱼肉的脂肪酸氧化^[10]。在三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)的研究中发现, 低盐环境下会通过影响糖代谢而影响风味形成^[11]; 在亚硝酸盐环境和硝酸盐环境中分别养殖的草鱼蛋白质代谢水平具有显著差异, 主要差异代谢物为精氨酸、脯氨酸和谷氨酸, 同时ABC转运蛋白(腺苷三磷酸结合盒转运蛋白)通路下的差异代谢物显著富集, 而这种转运蛋白与鱼类中土腥味物质GSM(土臭素)和2-MIB(2-甲基异莰醇)的吸收和转运具有密切相关, 这会导致亚硝酸盐环境下草鱼肌肉中土腥味物质的积累, 从而使鱼肉产生更多的异味^[12]。

本研究拟通过分析比较池塘养殖与陆基圆池养殖模式下彭泽鲫的养殖水质参数、脂肪酸组成、鲜味核苷酸含量、挥发性物质特征及非靶向代谢组学特征, 系统探究两种养殖模式对彭泽鲫肌肉风味品质的影响及其形成原因。试验结果将为彭泽鲫风味品质研究提供数据支撑, 同时为其品质改良和养殖模式的可持续发展提供理论依据和实践指导。

1 材料与方法

1.1 实验设计与样品采集

实验用鱼苗(23.23±1.90) g购自九江市彭泽县

彭泽鲫良种场, 购回后在抚州市南城县养殖基地分别采用池塘和陆基圆池两种模式进行养殖, 每个处理组设置3个养殖池, 陆基圆池养殖池直径6 m, 有效水深1.4 m, 放养密度为100 尾/m³; 池塘养殖池, 长10 m, 宽5 m, 有效水深1.4 m, 放养密度100 尾/m³, 使用同种水源和配合饲料(四川通威), 养殖6个月。每组随机选取健康无病、体形匀称、体重为(250.09±0.79) g共24尾彭泽鲫击晕处死后采集背部肌肉样品, 其中6尾用于电子鼻测试, 6尾供肌肉脂肪酸和鲜味核苷酸测定, 6尾用于肌肉挥发性成分测定, 剩余6尾鲫的肌肉置于液氮中保存, 用于后续代谢组学分析。

1.2 水质测定

在两种模式下每个养殖池中各采集4个不同点水样, 每周取样测量1次。总磷含量采用过硫酸钾氧化-紫外分光光度法, 氨氮的测定采用纳氏试剂分光光度法, 亚硝酸盐的测定采用盐酸萘乙二胺比色法, 悬浮物浓度则通过比色法进行分析。

1.3 电子鼻检测分析

称取背部肌肉约5 g于20 mL顶空瓶中, 加盖密封, 在100℃中水浴平衡10min, 室温下冷却后用AIRSENSE Analytics GmbH 便携式电子鼻(E-nose PEN3, 德国)对鱼肉进行挥发性物质测定。将电子鼻传感器探头插入瓶中, 进气流量150 mL/min, 数据采集时间45s。电子鼻10个传感器对应的敏感性气味物质种类见表1。

1.4 鱼肉脂肪酸测定

称取背部肌肉约2 g, 使用组织研磨仪粉碎后于15 mL离心管中, 加入4 mL石油醚。充分摇匀后开盖放气, 超声30min, 室温静置30min。离心后取上清液移至15 mL离心管中。加入5 mL 0.5 mol/L氢氧化钾-甲醇溶液, 充分摇匀后, 超声5min, 50℃水

表1 电子鼻传感器及相应的代表性敏感化合物

Tab. 1 Electronic nose sensors and corresponding representative sensitive compounds

序号 Serial number	传感器名称 Sensor name	灵敏物质 Sensitive substance
1	W1C	芳香族苯类物质
2	W5S	氮氧化合物
3	W3C	氨水、对芳香成分
4	W6S	氢化物
5	W5C	芳香族烷烃类物质
6	W1S	甲烷等短链烷烃
7	W1W	无机硫化物
8	W2S	醇醚醛酮类
9	W2W	有机硫化物
10	W3S	烷烃灵敏、长链烷烃类

浴静置15min, 离心取上清液, 吸取1 mL用0.22 μm 有机滤膜过滤, 装入气相进样小瓶, 直至测样。

使用气相色谱法进行鱼肉脂肪酸测定, 气相色谱仪(GC-MS 7890B, Agilent, 美国)配备火焰离子化检测器和熔融石英毛细管柱(J&W-SP2560, 100 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.20 μm)。柱温升高程序: 从100 $^{\circ}\text{C}$ 到250 $^{\circ}\text{C}$, 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 然后保持20min。进样器和检测器温度为220 $^{\circ}\text{C}$ 和250 $^{\circ}\text{C}$ 。

1.5 鱼肉挥发性成分测定

称取背部肌肉约2 g, 使用组织研磨仪粉碎后置于20 mL顶空瓶中, 使用TFE硅胶顶空隔垫的压顶盖密封小瓶。采用顶空固相微萃取(HS-SPME), 将顶空瓶置于90 $^{\circ}\text{C}$ 下孵化30min, 使用SPME纤维在样品瓶中吸附10min, 解吸2min后使用气相色谱-质谱联用仪(GC-MS)分析。使用配备色谱柱(SH-Wax 30 m $\times$ 0.25 mm $\times$ 0.25 μm)的GC-MS (GCMS-TQ8040 NX, Shimadzu, 日本)测定挥发性物质。使用氦气作为载气, 速度为1.5 mL/min, 柱温升高程序为: 从50 $^{\circ}\text{C}$ 到250 $^{\circ}\text{C}$, 10 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 保持10min。质谱扫描为35.00—400.00 m/z, 扫描间隔为0.3s。通过NIST 17质谱数据库比对MS数据进行定性。

1.6 鱼肉鲜味核苷酸测定

称取背部肌肉约2 g。置于15 mL离心管中, 加入10 mL 5% HClO_4 溶液, 用高速组织匀浆机打成浆状, 用5 mL清洗匀浆机, 8000 r/min, 离心5min, 将上清液移至50 mL容量瓶中, 重复1次沉淀再用5 mL 5% HClO_4 溶液震荡后离心, 合并滤液于容量瓶中。用0.5和5.0 mol/L NaOH溶液调pH至6.5, 定容至50 mL容量瓶中, 取1.5 mL离心5min, 12000 r/min, 取上清液过0.45 μm 有机滤膜分析。使用Acquity H OPLC CLASS超高效液相色谱仪(Waters, 美国)测定, 色谱柱: C18 4.6 mm $\times$ 250 mm, 5 μm ; 流动相: 0.05 mol/L pH 6.5 V (磷酸/三乙胺): V (甲醇)=98:2; 流速: 0.25 mL/min; 进样量: 10 μm ; 洗脱方式: 等度洗脱; 紫外检测器; 波长: 254 nm。

1.7 鱼肉非靶向代谢组学分析鉴定

称取鱼背部肌肉约50 mg至2 mL离心管中, 加入400 μL 提取液等, 使用冷冻组织研磨仪研磨, 低温超声提取30min后在-20 $^{\circ}\text{C}$ 下静置, 离心后移至进样小瓶中待测。

采用UHPLC -Triple TOF 系统对代谢物进行分离。色谱条件为色谱柱ACQUITY UPLC HSS T3 (100 mm $\times$ 2.1 mm i.d., 1.8 μm ; Waters, Milford, 美国)对代谢物进行色谱分离。流动相A为95%水+5%乙腈(含0.1%甲酸), 流动相B为47.5%乙腈+47.5%异丙醇+5%水(含0.1%甲酸); 流速为0.40 mL/min,

进样量为10 μL , 柱温为45 $^{\circ}\text{C}$ 。质谱条件: 样品经电喷雾电离, 分别采用正、负离子扫描模式采集质谱信号。具体参数见表2。

用代谢组学处理软件ProgenesisQI v3.0 (WatersCorporation, Milford, 美国)对原始数据进行特征峰搜库鉴定; 设置MS质量误差小于10 ppm, 将MS和MS/MS质谱信息与代谢数据库进行匹配, 并根据二级质谱匹配得分鉴定代谢物。主要代谢数据库为<http://www.hmdb.ca/>、<https://metlin.scripps.edu/>数据库; 采用Majorbio云平台(<https://cloud.majorbio.com>)上的ropls (Version 1.6.2, <https://bioconductor.org/packages/release/bioc/html/ropls.html>) R包进行差异代谢物分析, 将差异代谢物映射到KEGG数据库(<http://www.genome.jp/kegg/pathway.html>)进行富集通路分析。

1.8 数据分析

进行单因素方差分析(One-way ANOVA), 结果以平均值 $\pm$ 标准误表示, 差异显著性水平为($P < 0.05$); 图形使用Origin 2021软件绘制, 代谢组数据图形绘制使用MajorBio云平台, 相关性分析使用软件The Unscrambler X 10.4。

2 结果

2.1 水质差异

如表3所示, 两种养殖模式水质指标除亚硝酸盐氮和悬浮物无显著差异($P > 0.05$); 陆基圆池养殖水体总磷、总氮和氨氮含量均显著高于池塘养殖($P < 0.05$)分别为其2.96、1.65和1.38倍。

2.2 肌肉脂肪酸组成分析

由表4可知, 通过气相色谱法在两种养殖模式养殖彭泽鲫肌肉中检出脂肪酸22种, 其中池塘养殖鱼中单独检出了C20:3 (二十碳三烯酸n-3), 陆基圆

表2 质谱参数

Tab. 2 Mass spectrometry parameters

描述Description	参数Parameter
扫描类型Scan type (m/z)	50—1200
离子源气体1 Ion Source Gas1 (psi)	50
离子源气体2 Ion Source Gas2 (psi)	50
幕气Curtain Gas (psi)	35
源温度Source Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	500
离子喷雾电压浮动IonSpray Voltage Floating (+) (V)	5500
离子喷雾电压浮动IonSpray Voltage Floating (-) (V)	-4500
接口加热器Interface Heater	on
去簇潜力Declustering Potential (V)	80
碰撞能量Collision Energy (eV)	40 $\pm$ 20

表 3 两种养殖模式水域的水质差异

Tab. 3 Differences in water quality between two aquaculture modes in water bodies

指标 Index	池塘养殖 Pond aquaculture	陆基圆池养殖 Land-based round pond aquaculture
总磷TP(mg/L)	0.26±0.09 ^b	0.77±0.02 ^a
悬浮物Suspended solid(mg/L)	71.68±11.72	90.34±34.59
总氮TN(mg/L)	4.75±0.96 ^b	7.84±0.26 ^a
氨氮NH ₃ -H(mg/L)	1.62±0.14 ^b	2.25±0.10 ^a
亚硝酸盐NO ₂ ⁻ (mg/L)	0.03±0.01	0.04±0.02

注: 同列数值后标有不同上标字母表示差异显著($P<0.05$); 下同

Note: Different superscript letters on the same column indicate significant differences ($P<0.05$); the same applies below

池养殖鱼则单独检出了C13:0 (十三烷酸)。两种模式养殖鱼相同脂肪酸的有20种; 池塘养殖鱼饱和脂肪酸占7种, 单不饱和脂肪酸6种, 多不饱和脂肪酸9种; 陆基圆池养殖鱼饱和脂肪酸占6种, 单不饱和脂肪酸6种, 多不饱和脂肪酸10种。两种养殖模式鱼含量最多的为油酸, 分别占总脂肪酸的37.24%和42.46%, 因而单不饱和脂肪酸的相对总量均最高, 达总脂肪酸的40%以上; 含量排在第二、第三位的脂肪酸分别为亚油酸和棕榈酸。

与陆基圆池养殖组相比, 池塘养殖彭泽鲫饱和脂肪酸显著增高($P<0.05$); 单不饱和脂肪酸显著降低($P<0.05$); 多不饱和脂肪酸则显著升高($P<0.05$), 其中n-6系多不饱和脂肪酸(n-6 PUFA)增高显著, n-3系多不饱和脂肪酸(n-3 PUFA)无显著差异($P>0.05$)。

2.3 肌肉鲜味核苷酸含量分析

如图1所示, 彭泽鲫背肌中鸟苷酸含量高于肌苷酸含量, 二者比例约为3:1; 池塘养殖模式鱼鸟苷酸和肌苷酸含量均略高于陆基圆池养殖鱼, 但二者差异不显著($P>0.05$)。

2.4 两种养殖模式鱼肌肉电子鼻和GC-MS检测挥发性物质分析

利用电子鼻检测两种养殖模式鱼背肌熟肉的结果如图2A。除W3S (长烷烃类)和W1W (无机硫化物)外, 其他挥发性物质响应值陆基圆池养殖鱼都高于池塘养殖鱼, 特别是W1S (短链烷烃类)和W2S (醇醚醛酮类)。

通过GC-MS检测, 两种养殖模式鱼肌肉中共检出141种挥发性物质, 其中池塘养殖鱼检测出109种, 陆基圆池养殖鱼100种, 在两种养殖模式都检测出来的有67种; 含量最多的为酯类、醇类和醛类, 占比为32.1%、18.6%和15% (图2B)。但有些挥发性物质只在单一样本中鉴定出, 池塘养殖组内都鉴定出的挥发性物质有34种, 陆基圆池有35种, 并将这

表 4 两种养殖模式彭泽鲫背肌中脂肪酸组成(占总脂肪酸的百分比%)

Tab. 4 Fatty acid composition in the dorsal muscle of Pengze crucian carp between two culture modes (percentage of total fatty acids%)

脂肪酸 Fatty acid	池塘养殖 Pond aquaculture	陆基圆池养殖 Land-based round pond aquaculture
C13:0十三烷酸	0.85±0.03	ND
C16:0棕榈酸	16.53±0.18	16.32±0.48
C17:0十七烷酸	0.44±0.02 ^a	0.32±0.01 ^b
C18:0硬脂酸	3.99±0.16	4.06±0.11
C21:0二十烷酸	2.20±0.12 ^a	1.76±0.13 ^b
C22:0山嵛酸	0.88±0.02 ^a	0.60±0.08 ^b
C23:0二十三烷酸	0.72±0.03 ^b	1.23±0.09 ^a
ΣSFA	25.62±0.19 ^a	24.26±0.48 ^b
C14:1肉豆蔻酸	1.65±0.03	1.73±0.48
C15:1十五碳烯酸	0.46±0.03 ^a	0.35±0.02 ^b
C17:1十七碳烯酸	0.37±0.07	0.47±0.01
C18:1油酸	37.24±0.60 ^b	42.46±0.90 ^a
C20:1二十碳烯酸	0.32±0.02 ^b	0.65±0.07 ^a
C22:1芥酸	0.75±0.12	0.91±0.05
ΣMUFA	40.68±0.59 ^b	46.43±1.13 ^a
C18:2亚油酸 n-6	23.82±0.63 ^a	19.15±1.12 ^b
C18:3 γ-亚麻酸 n-6	0.23±0.01 ^a	0.15±0.01 ^b
C18:3 亚麻酸 n-3	2.05±0.15	2.36±0.25
C20:2二十碳二烯酸 n-6	0.23±0.01 ^a	0.09±0.04 ^b
C20:3二十碳三烯酸 n-3	ND	0.39±0.04
C20:3二十碳三烯酸 n-6	0.38±0.01	0.49±0.10
C20:4花生四烯酸 n-6	0.25±0.01 ^a	0.16±0.04 ^b
C22:2二十二碳二烯酸 n-6	0.15±0.01	0.13±0.01
C20:5二十碳五烯酸 n-3	0.16±0.03	0.21±0.14
C22:6二十二碳六烯酸 n-6	0.58±0.04	0.51±0.23
ΣPUFA	27.64±0.65 ^a	23.26±0.69 ^b
Σn-3 PUFA	0.94±0.13	1.14±1.52
Σn-6 PUFA	26.46±0.83 ^a	21.97±2.35 ^b
Σ(EPA+DHA)	0.74±0.06	0.69±0.34
Σ(EPA+DHA)/PUFA	2.67±0.20	3.16±1.71
Σn-3 PUFAs/Σn-6 PUFA	0.04±0.01	0.06±0.02

注: ND表示未检出; ΣSFA代表饱和脂肪酸总量; ΣMUFA代表单不饱和脂肪酸总量; ΣPUFA代表多不饱和脂肪酸总量; Σn-3 PUFA代表n-3多不饱和脂肪酸总量; Σn-6 PUFA代表n-6多不饱和脂肪酸总量; Σ(EPA+DHA)代表二十碳五烯酸和二十二碳六烯酸的总量

Note: ND means not detected; ΣSFA represents the total saturated fatty acids; ΣMUFA represents the total monounsaturated fatty acids; ΣPUFA represents the total polyunsaturated fatty acids; Σn-3 PUFA represents the total n-3 polyunsaturated fatty acids; Σn-6 PUFA represents the total n-6 polyunsaturated fatty acids; Σ(EPA+DHA) represents the total eicosapentaenoic acid and docosahexaenoic acid

些挥发性物质挑选出来绘制表达丰度热图2C, 同时进行单因素方差分析, 结果显示两种养殖模式鱼

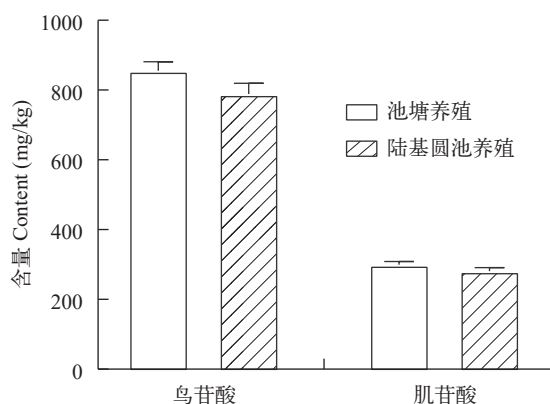


图1 两种养殖模式肌肉鲜味核苷酸的比较

Fig. 1 Comparison of muscle flavor nucleotides between two culture modes

中乙偶姻(乙酰甲基甲醇)、醋酸、肉豆蔻酸乙酯、9-十六烯酸乙酯、月桂酸、(all-Z) 9, 12, 15-十八碳三烯酸甲酯、花生四烯酸乙酯、十五烷酸、油酸、甲基 γ -亚麻酸酯、十五醛11种物质在表达丰度上具有显著差异($P < 0.05$), 且陆基圆池养殖模式鱼还单独检出羟基丙酮和(Z)-18-十八碳-9-烯内酯2种物质, 而在池塘养殖鱼则单独检出月桂酸乙酯。两种养殖模式鱼挥发性物质总丰度(TIC峰总面积)如图2D所示, 陆基圆池养殖模式鱼显著高于池塘养殖($P < 0.05$)。

2.5 两种养殖模式鱼肌肉代谢组分析结果

从PCA(主成分分析)图3A所示, 组内的数据离散度较高, 样本间明显分离, 表明两种养殖模式鱼肌肉代谢物种类具有明显差异。本研究在两种养殖模式鱼肌肉中一共检测到代谢物1123种, 其中差异代谢物有312种, 相较于陆基圆池养殖鱼, 池塘养殖鱼有131种差异代谢物表达上调, 181种差异代谢物表达下调, 绘制成的火山图如图3B所示。进一步将差异代谢物进行HMDB(人类代谢组数据库)化合物分类(图3C), 主要的差异代谢物为脂肪酰基类分子、甘油磷脂类分子、羧酸及其衍生物类分子分别占其19.39%、13.95%和10.54%。

以VIP (Variable Importance in Projection) >4的18种差异代谢物作为两种养殖模式鱼风味的关键性差异代谢物, 如图3C所示, 这些代谢物表达量陆基圆池模式鱼显著高于池塘养殖鱼($P < 0.05$)。将312种差异代谢物进行KEGG富集通路分析, 一共鉴定出181条, 将其中差异最显著的10条通路绘制成气泡图(图3D), 结果显示类固醇生物激素合成和花生四烯酸代谢是差异最显著的两条代谢通路, 因而确定为主要差异代谢通路。

3 讨论

3.1 养殖环境对鱼肉品质和风味的影响

鱼类的生活环境可通过影响鱼肉品质和脂肪代谢直接或间接地影响鱼肉风味。相比于池塘养殖模式鱼, 循环水养殖模式鱼因为持续的水流运动可能促进鱼类肌肉纤维紧实度, 提高鱼肉品质^[6]; 同时高密度养殖会导致水体中的氨氮和磷含量显著增加, 降低日本鳗鲡的脂肪和蛋白含量^[13, 14]; 同时过高的亚硝酸盐会导致鱼体的血红蛋白变性从而降低血液供氧能力, 进而影响鱼新陈代谢和肌肉品质。而在本研究中, 两种养殖模式中水域总磷、总氮和氨氮指标存在显著差异, 这可能是导致两种养殖模式鱼肌肉品质和风味差异的重要因素。

3.2 两种模式对彭泽鲫脂肪酸和风味物质的影响

脂肪酸组成是影响肉类挥发性风味形成的主要因素, 有研究表明单不饱和脂肪酸含量与整体风味呈正相关^[15]。一些脂肪酸本身具有挥发性可作为风味物质, 也可作为风味前体物质, 许多挥发性风味物质是脂肪酸脂质氧化后的产物^[16, 17]。鱼类挥发性风味物质的前体物质主要为不饱和脂肪酸, 其中醇类物质多来自多不饱和脂肪酸氧化^[18]; 许多醛类则是来自亚油酸、亚麻酸和花生四烯酸的自氧化^[19]。在本次研究中发现池塘养殖模式鱼多不饱和脂肪酸特别是亚油酸显著高于陆基圆池养殖鱼, 而单不饱和脂肪酸含量特别是油酸则显著低于陆基圆池养殖鱼, 这可能是形成两种养殖模式鱼风味差异的重要原因。

风味由滋味和气味组成, 滋味主要受非挥发性的呈味物质影响, 而气味则由挥发性物质决定。肌苷酸和鸟苷酸是影响鱼肉滋味的重要因素, 能够显著提高谷氨酸的鲜味效果^[20, 21], 但在本研究中发现两种养殖模式鱼的鲜味核苷酸并无显著性差异。不过在本研究中两种养殖模式鱼气味物质具有较大差异, 并鉴定出14种差异挥发性物质作为区分两种养殖模式彭泽鲫的特征风味物质。

醛类和醇类等风味物质的前体物质为多不饱和脂肪酸; 一般认为短链醛具有令人愉悦的青草味, 但长链醛($C > 10$)会有一种让人不适的油腻感^[22], 本试验中两种养殖模式鱼乙醛、己醛、壬醛、十六醛、十八醛无显著性差异, 但池塘养殖鱼中的异味物质十五醛显著高于陆基圆池养殖鱼; 醇类中饱和醇通常具有较高的感官阈值, 对整体风味的影响较小, 但不饱和醇感官阈值较低, 对风味影响更大^[23, 24], 1-辛烯-3-醇具有蘑菇味, 而1-己醇和2, 3-丁二醇则赋予鱼肉清新和水果味, 但在本实验中两种

养殖模式鱼醇类挥发性物质无显著差异。

本实验中鉴定出较多酯类物质, 酯类挥发性物

质主要来自羧酸和醇类物质酯化反应, 通常具有甜味和果香味^[22], 而陆基圆池养殖鱼酯类挥发性物质

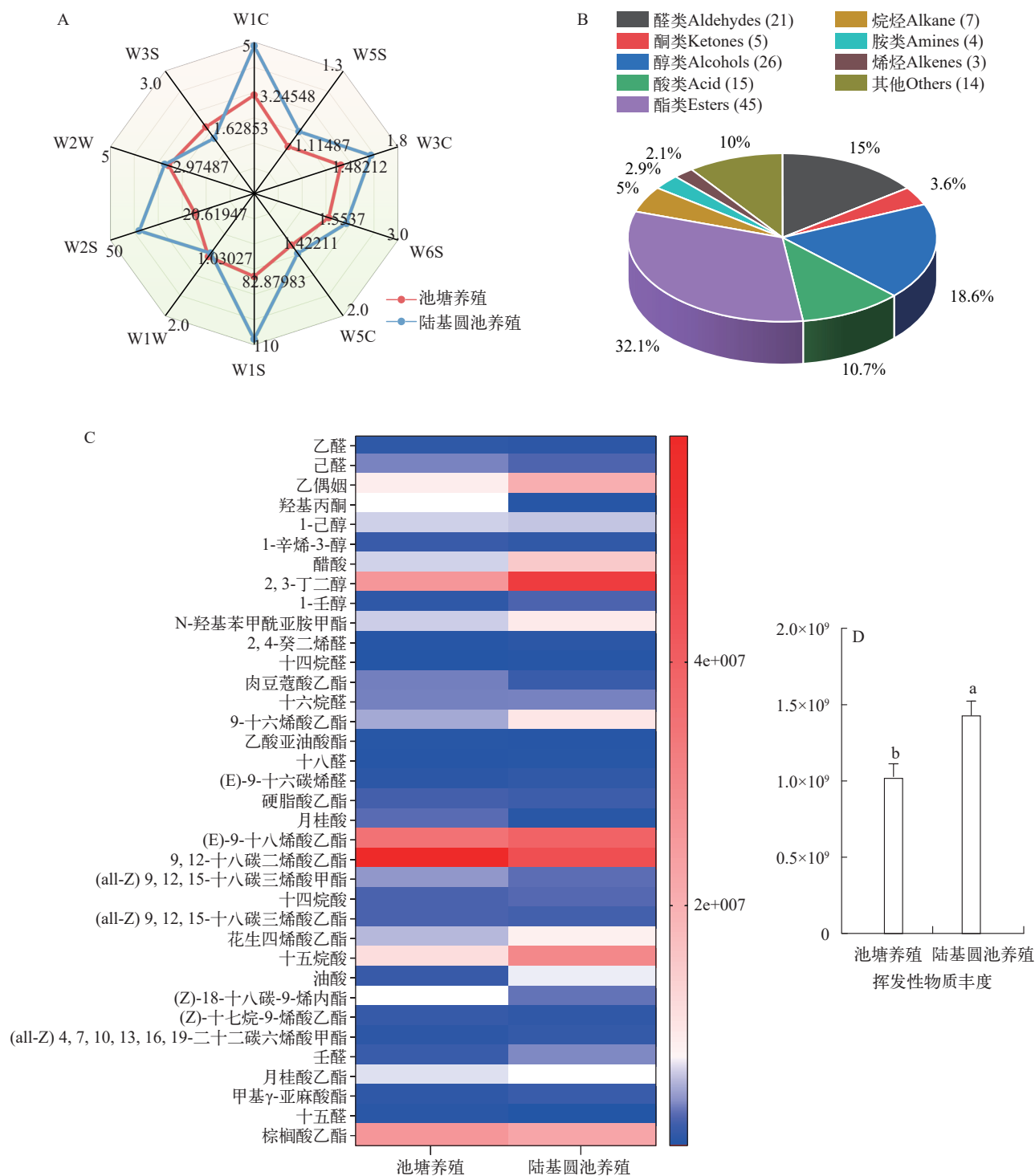


图2 两种养殖模式彭泽鲫电子鼻和挥发性物质结果

Fig. 2 Results of electronic nose and volatile compounds of Pengze crucian carp between two culture modes

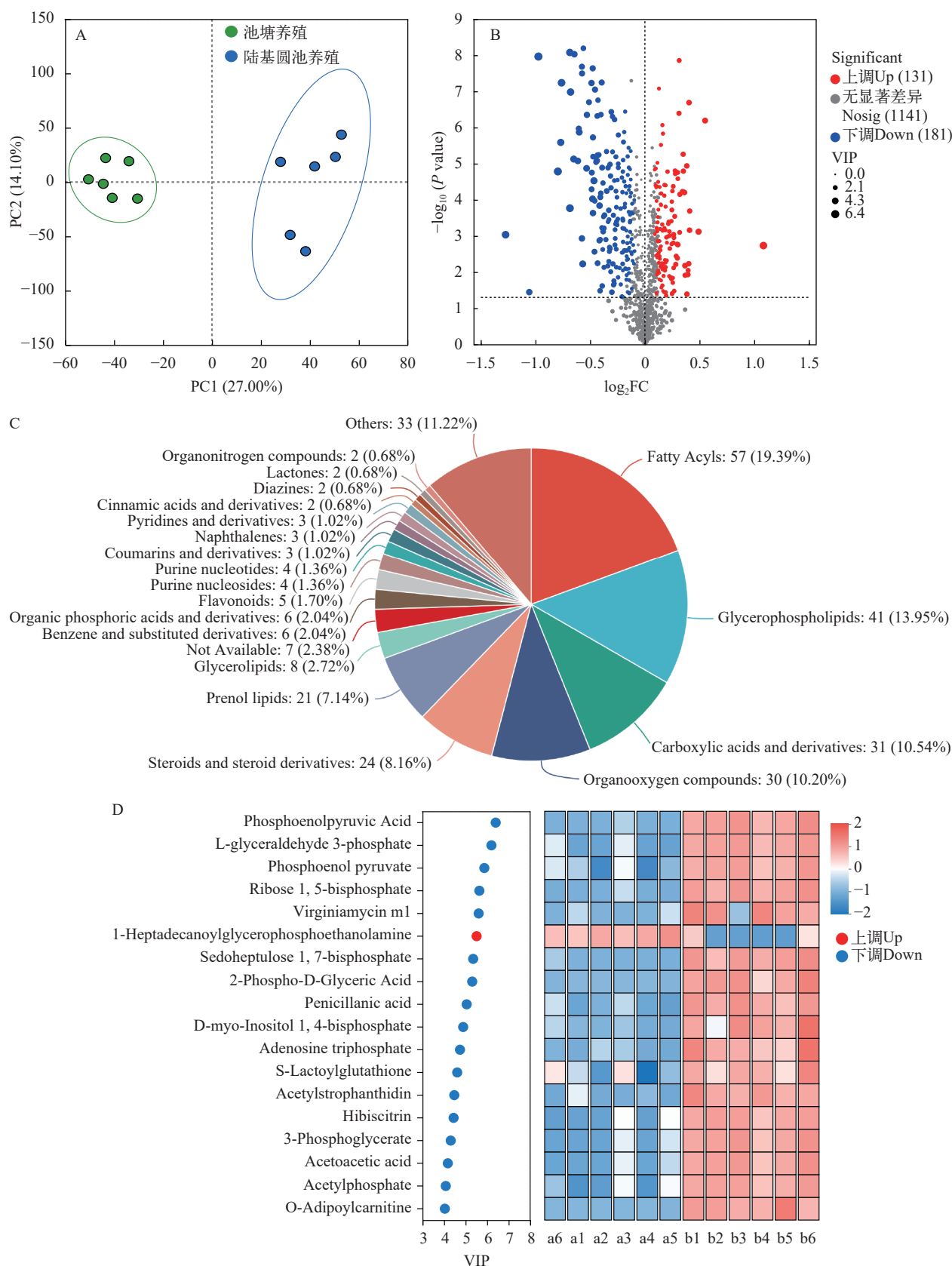
A. 不同养殖模式下电子鼻雷达图, 轴上数值为电子鼻不同传感器的响应值; B. 为彭泽鲫挥发性物质分类; C. 彭泽鲫挥发性风味物质的表达丰度(丰度从大到小, 红→白→蓝); D. 为不同养殖模式下挥发性物质总丰度, 不同字母代表显著性差异, $P < 0.05$

A. The radar image of the electronic nose under different culture modes, and the values on the axis are the response values of different sensors of the electronic nose; B. The classification of volatile compounds in Pengze crucian carp; C. The expression abundance of volatile flavor compounds in Pengze crucian carp (from high to low, red→white→blue); D. The total abundance of volatile substances under different culture modes, with different letters representing significant differences ($P < 0.05$)

的种类更多并且含量更高,如9-十六烯酸乙酯、花生四烯酸乙酯、甲基 γ -亚麻酸酯。

本实验中两种养殖模式鱼中酸类物质差异较

大,但有研究表明酸类为高阈值物质,在整体风味中作用不大,主要起辅助作用^[25,26]。陆基圆池养殖鱼中的醋酸丰度显著高于池塘养殖,而这是一种异



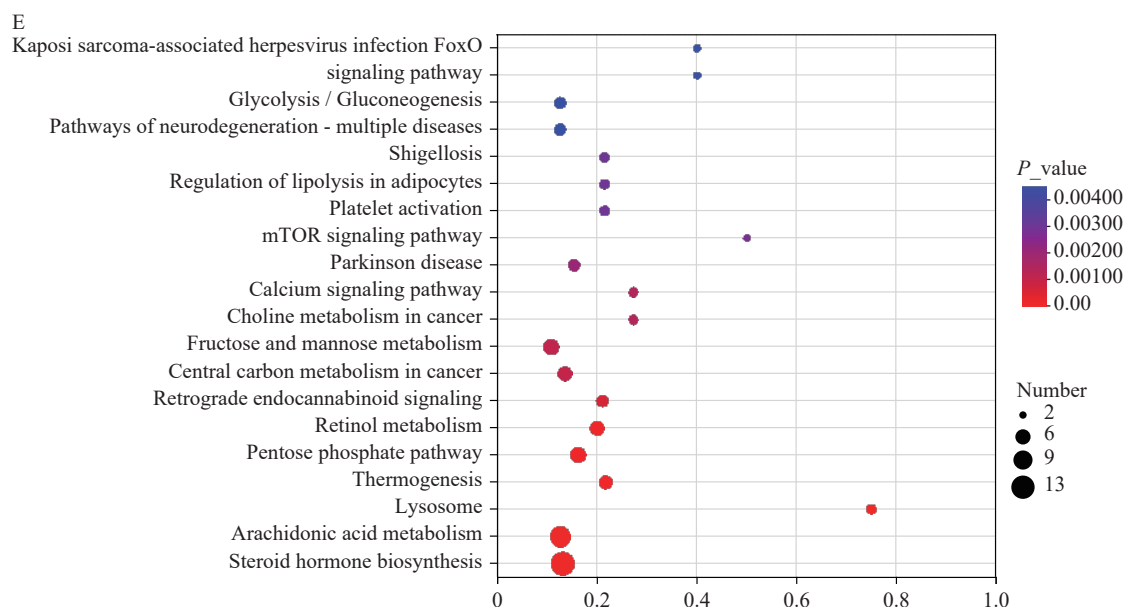


图3 两种养殖模式下彭泽鲫代谢物分析

Fig. 3 Metabolite analysis of Pengze crucian carp between two culture modes ($n=6$)

A. 横坐标代表第一主成分PC1,纵坐标代表第二主成分PC2; B. 横坐标为代谢物在两组间表达差异的倍数变化值,即 $\log_2FC$,纵坐标为代谢物表达量变化差异的统计学检验值,即 $-\log_{10}(P\text{-value})$ 值,值越高则表达差异越显著,每个点代表一个代谢物,蓝点代表在池塘养殖中表达下调,红点表示上调; C. 差异代谢物HMDB分类; D. 左侧为代谢物VIP气泡图, Y轴表示代谢物, X轴是VIP值,代谢物按照VIP值大小,从上到下排列; 右侧为代谢物表达量热图,下方为样本名称, a1— a6代表池塘养殖1—6号样本, b1— b6代表陆基圆池养殖1—6号样本; 颜色表示该代谢物在该组样本中相对表达量的大小; D. 横坐标为富集显著性 P 值, P 值越小,在统计学上就越有显著意义; 纵坐标为KEGG通路; 图中气泡的大小代表该通路中富集到差异代谢物数量

A. The horizontal axis represents the first principal component PC1, and the vertical axis represents the second principal component PC2; B. The horizontal axis represents the fold change value of metabolite expression difference between two groups, i.e. $\log_2FC$, and the vertical axis represents the statistical test value of metabolite expression change difference, i.e. $-\log_{10}(P\text{-value})$ value; The higher the value, the more significant the expression difference. Each point represents a metabolite, with blue points indicating downregulation and red points indicating upregulation in pond aquaculture; C. Classification of differential metabolites in HMDB; D. On the left is a metabolite VIP bubble plot, with the Y-axis representing metabolites and the X-axis representing VIP values. Metabolites are arranged from top to bottom according to their VIP values; On the right is a heatmap of metabolite expression levels, and below are sample names. a1— a6 represents samples 1—6 from pond aquaculture, and b1— b6 represents samples 1—6 from land-based round pond aquaculture; The color represents the relative expression level of the metabolite in the sample group. Fig. D. The horizontal axis represents the enrichment significance P -value. The smaller the P -value, the more statistically significant it is; The vertical axis represents the KEGG pathway; The size of the bubbles in the figure represents the amount of differential metabolites enriched in the pathway

味物质,可能会赋予鱼肉腐败和腐臭的味道^[27]; 陆基圆池养殖鱼中的月桂酸表达丰度显著低于池塘养殖,这是一种饱和脂肪酸,具有类似金属的味道; 十五烷酸和油酸含有异味,并且在陆基圆池养殖鱼中的这两种物质都显著高于池塘养殖模式鱼。

陆基圆池养殖鱼中的乙偶姻显著高于池塘养殖鱼,这是一种具有奶油香味的物质^[28]。同时在陆基圆池养殖鱼中检测到的羟基丙酮是一种含有焦糖香味的物质^[29],常出现于熟肉中,这两种物质会赋予鱼肉香味。

综上所述,尽管陆基圆池养殖鱼中酸类和异味物质增加,但奶香物质和果香酯类的显著提升可能掩盖部分负面风味,并且消费者对水产品风味的接受度更依赖于整体香气复杂度而非单一异味成

分。同时随着市场需求的多样化,不同消费者对风味的喜好也不同,本研究结果为应对不同的风味需求提供了理论和数据支持。

3.3 两种养殖模式对彭泽鲫背肌代谢物的影响

在本次试验鉴定到的18种关键性差异代谢物中,有10种为磷酸与其他物质结合生成的衍生物,它们是糖代谢、氨基酸代谢和脂肪代谢等代谢途径中的重要代谢中间产物,同时有研究表明许多磷酸化蛋白酶都是重要的风味前体物质^[30]。有研究表明当水体中的氨氮水平升高时,草鱼肌肉中的蛋白质含量会升高^[31],同时可能也会使肌肉中一些与蛋白质相关的代谢产物增加。在用氨氮浓度为10 mg/L的水域胁迫喂养四指鳍幼鱼96h后发现,相较于氨氮浓度为0.1 mg/L水域喂养幼鱼,其中肌肉

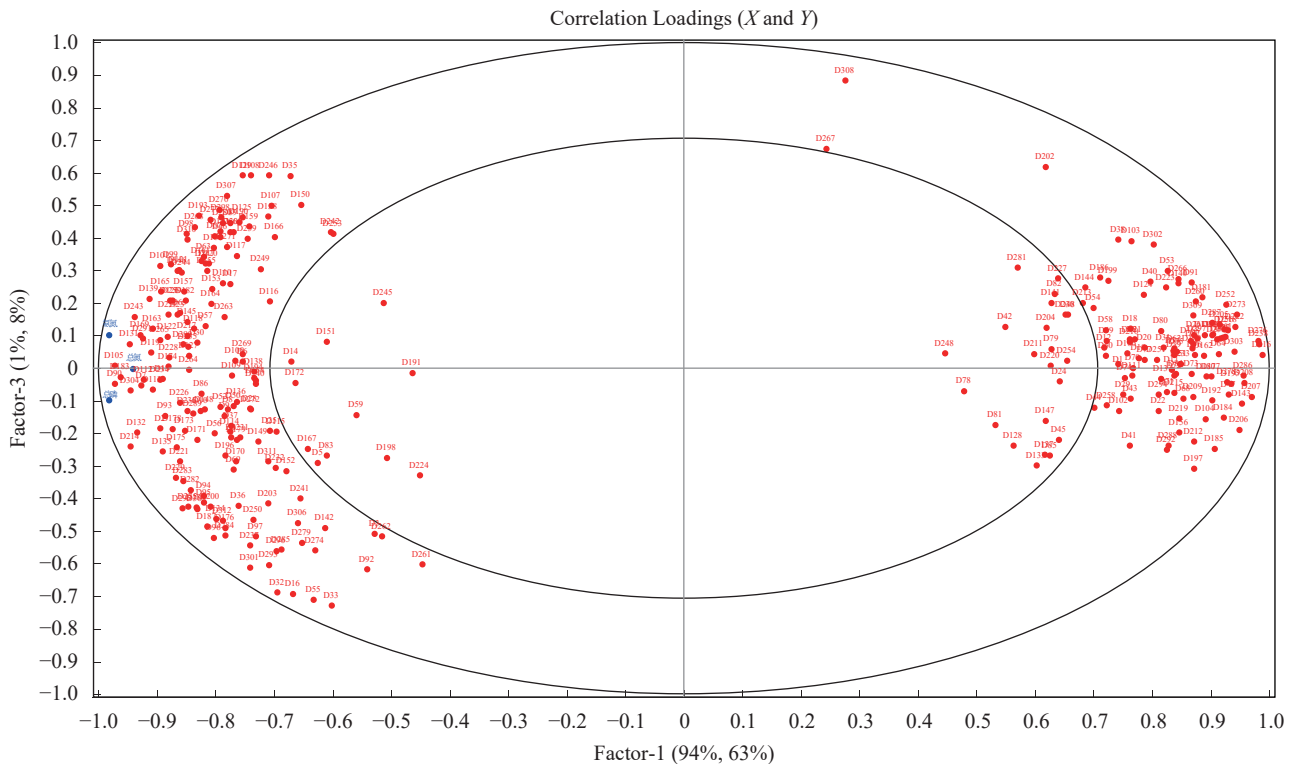


图4 水质指标和差异代谢物相关性分析

Fig. 4 Correlation analysis between water quality indicators and differential metabolites

中有272种代谢物上调, 而151种代谢物下调^[32], 本研究结果与之类似, 氨氮浓度高的陆基圆池养殖鱼相较于氨氮浓度低池塘养殖有181种代谢物表达上调, 但只有131种代谢物表达下调, 结果与上述研究基本一致, 说明陆基圆池养殖鱼肌肉拥有更多的代谢产物蓄积, 包含脂类、糖类、有机酸、氨基酸、肽类和脂肪酸等物质, 提高了风味前体物质含量^[33], 从而造成不同于池塘养殖模式鱼的风味差异。以水质指标为X轴, 差异代谢物为Y轴建立PLSR相关性分析, 发现大多数指标都在50%—100%, 表明水质和差异代谢物之间具有很强的相关性, 并且大部分代谢物与水质指标呈正相关, 如图4所示, 陆基圆池养殖水体中较高的氨氮和总磷水平可能通过激活鱼类类固醇激素合成和花生四烯酸等代谢通路, 促使脂肪酸重新分配和代谢物的累积, 进而衍生更多的挥发性物质。

有研究表明膳食花生四烯酸可上调鱼类FAS (脂肪酸合成酶)和FATB (脂肪酸转运蛋白)的表达, 而FAS会促进单不饱和脂肪酸的合成, 影响鱼体脂肪酸组成^[14, 34]; 并且有许多研究表明花生四烯酸会影响类固醇类激素水平^[35, 36], 而游离脂肪酸和甘油三酯代谢与类固醇类激素中的性激素水平密切相关^[37]。因而, 类固醇生物激素合成和花生四烯酸代谢这两种通路均与机体脂肪代谢紧密联系, 影响

脂肪酸等风味前体物质的组成, 是两种养殖模式鱼风味差异形成的主要代谢通路。

4 结论

利用非靶向代谢组学方法从彭泽鲫中分析鉴定出18种特征性的差异代谢物; 基于KEGG通路分析, 上述化合物是通过花生四烯酸代谢和类固醇激素合成两条通路参与机体脂质代谢和脂肪酸合成, 继而影响乙偶姻、羟基丙酮、醋酸、肉豆蔻酸乙酯、9-十六烯酸乙酯、月桂酸、(all-Z) 9, 12, 15-十八碳三烯酸甲酯、花生四烯酸乙酯、十五烷酸、油酸、(Z)-18-十八碳-9-烯内酯、月桂酸乙酯、甲基γ-亚麻酸酯、十五醛14种差异挥发性风味物质沉积, 造成两种模式养殖鱼风味差异形成, 这也是生长环境中诸多因素所诱导代谢变化的结果。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

参考文献:

- [1] Ding L Y, Rao Y, Chen W J, *et al.* Effects of feeding frequency on growth performance, body index and muscle quality of juvenile Pengze crucian carp [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, **45**(19): 228-231. [丁立云, 饶毅, 陈文静, 等. 投喂频率对彭泽鲫幼鱼生长性能、形体指标和肌肉品质的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2017, **45**(19): 228-231.]
- [2] Shao J H. Pengze *Carassius auratus* with high quality and

- high efficiency [J]. *Shanghai Agricultural Science and Technology*, 1998(6): 46. [邵金华. 优质高效的优良品种——彭泽鲫 [J]. 上海农业科技, 1998(6): 46.]
- [3] Ma F R, Wang L, Huang J T, *et al.* Comparative study on nutritional quality and serum biochemical indices of common carp (*Cyprinus carpio*) aged 11 to 13 months aged cultured in traditional ponds and land-based container aquaculture systems [J]. *Food Research International*, 2023(169): 112869.
- [4] Shen J Q, Tang L W, Jun C, *et al.* Experiment on golden crucian carp culture with circulating water model in land-based round pond [J]. *Scientific Fish Farming*, 2023(3): 22-23. [沈佳庆, 唐蕾文, 俊程, 等. 陆基圆池循环水模式养殖黄金鲫试验 [J]. 科学养鱼, 2023(3): 22-23.]
- [5] Xie Y X, Yu E M, Jiang L Y, *et al.* Comparative analysis of growth performance, physiological and biochemical indices, and muscular texture of frail meat tilapia and common tilapia in land-based round pond [J]. *Feed Research*, 2024, 47(23): 68-72. [谢宇翔, 郁二蒙, 江林源, 等. 陆基圆池模式下脆肉罗非鱼和普通罗非鱼生长性能、生理生化指标和肌肉质构比较分析 [J]. 饲料研究, 2024, 47(23): 68-72.]
- [6] Jia S P, Wang L, Zhang J M, *et al.* Comparative study on the morphological characteristics and nutritional quality of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) cultured in an aquaculture system using land-based container with recycling water and a traditional pond system [J]. *Aquaculture*, 2022(549): 737721.
- [7] Yu Y L, Lu X R, Dong L X, *et al.* Evaluation of nutritional and flavor quality of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) cultured in low-salinity water and fresh water [J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2024, 39(3): 470-479. [喻亚丽, 鲁晓蓉, 董立学, 等. 低盐和淡水养殖模式下草鱼肌肉营养和风味品质评价 [J]. 大连海洋大学学报, 2024, 39(3): 470-479.]
- [8] Wen C, Chen Y, Madina, *et al.* Identification and characterization of goat milk key flavor compounds and their precursors in electron beam irradiation and pasteurization on raw [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2023(87): 103416.
- [9] Zhou Y, Zhang Y, Liang J, *et al.* From formation to solutions: Off-flavors and innovative removal strategies for farmed freshwater fish [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 2024(144): 104318.
- [10] Li Y C. Effects and mechanisms of chronic microcystin-LR exposure on growth and muscle quality of tilapia [D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2024: 33-39. [李奕潮. 慢性微囊藻毒素-LR暴露对罗非鱼生长和肌肉品质的影响及机制研究 [D]. 上海: 上海海洋大学, 2024: 33-39.]
- [11] Chen W W. Effects of short-term low salinity stress on the physiology, metabolism and non-volatile flavor substances of *Portunus trituberculatus* [D]. Ningbo: Ningbo University, 2021. [陈娓娓. 短期低盐胁迫对三疣梭子蟹的生理、代谢及非挥发性风味物质的影响 [D]. 宁波: 宁波大学, 2021.]
- [12] Akroko J, Bediako J O, Fafanyo K, *et al.* Relatedness of hypoxia and hyperthermia tolerances in the Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) and their relationships with cardiac and gill traits [J]. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2024(294): 111648.
- [13] Yang J W, Gao M, Chen S, *et al.* Stocking density on water quality and nutritional quality of *Anguilla japonica* in summer and autumn [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2024, 48(6): 979-990. [杨佳雯, 高敏, 陈森, 等. 放养密度对日本鳗鲡夏秋两季养殖水质及营养品质的影响 [J]. 水生生物学报, 2024, 48(6): 979-990.]
- [14] Zhong X, Xu B, Liu J X, *et al.* Effects of arachidonic acid (ARA) on reproduction, immunity, and lipid metabolism of *Penaeus vannamei* broodstocks [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2024, 48(9): 62-77. [钟箫, 徐斌, 刘嘉欣, 等. 花生四烯酸(ARA)对凡纳对虾亲本繁殖、免疫及脂质代谢的影响 [J]. 水产学报, 2024, 48(9): 62-77.]
- [15] Niu Y, Wu M, Xiao Z, *et al.* Effect of fatty acids profile with thermal oxidation of chicken fat on characteristic aroma of chicken flavors assessed by gas chromatography-mass spectrometry and descriptive sensory analysis [J]. *Food Science and Technology Research*, 2016, 22(2): 245-254.
- [16] Shi J, Nian Y, Da D, *et al.* Characterization of flavor volatile compounds in sauce spareribs by gas chromatography-mass spectrometry and electronic nose [J]. *LWT*, 2020(124): 109182.
- [17] Zhang F, Li L, Li P, *et al.* Fish oil replacement by beef tallow in juvenile turbot diets: Effects on growth performance, body composition and volatile flavor compounds in the muscle [J]. *Aquaculture*, 2023(564): 739070.
- [18] Zhu W, Luan H, Bu Y, *et al.* Flavor characteristics of shrimp sauces with different fermentation and storage time [J]. *LWT*, 2019(110): 142-151.
- [19] Sun L H, Bao C R, Li Q, *et al.* Effects of industrialized circulating aquaculture mode on muscle nutritional components and volatile flavor compounds of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2024, 36(5): 3192-3208. [孙丽慧, 包成荣, 李倩, 等. 工厂化循环水养殖模式对大口黑鲈肌肉营养成分和挥发性风味物质的影响 [J]. 动物营养学报, 2024, 36(5): 3192-3208.]
- [20] Jarrault C, Dornier M, Labatut M L, *et al.* Coupling nanofiltration and osmotic evaporation for the recovery of a natural flavouring concentrate from shrimp cooking juice [J]. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2017(43): 182-190.
- [21] He L Y, Shi X L, Lin J Y, *et al.* Cloning of *adsl* gene in *Larimichthys crocea* and analysis of its correlation

- between expression level and inosine content [J]. *South China Fisheries Science*, 2024, 20(2): 111-118. [何亮银, 史晓丽, 林佳阳, 等. 大黄鱼*adsl*基因的克隆及其表达量与肌苷酸含量的关联性分析 [J]. 南方水产科学, 2024, 20(2): 111-118.]
- [22] Liang R, Lin S, Chen D, *et al.* Differentiation of *Penaeus vannamei* from different thermal processing methods in physico-chemical, flavor and sensory characteristics [J]. *Food Chemistry*, 2022(378): 132092.
- [23] Cai L, Ao Z, Tang T, *et al.* Characterization of difference in muscle volatile compounds between triploid and diploid crucian carp [J]. *Aquaculture Reports*, 2021(20): 100641.
- [24] Liu Y, Al-Dalali S, Hu Y, *et al.* Effect of different processing steps in the production of beer fish on volatile flavor profile and their precursors determined by HS-GC-IMS, HPLC, E-nose, and E-tongue [J]. *Food Chemistry*: X, 2024(23): 101623.
- [25] Wei Q, Liu G, Zhang C, *et al.* Identification of characteristic volatile compounds and prediction of fermentation degree of pomelo wine using partial least squares regression [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022(154): 112830.
- [26] Tian H, Xiong J, Sun J, *et al.* Dynamic transformation in flavor during hawthorn wine fermentation: Sensory properties and profiles of nonvolatile and volatile aroma compounds coupled with multivariate analysis [J]. *Food Chemistry*, 2024(456): 139982.
- [27] Wu T, Wang M, Wang P, *et al.* Advances in the formation and control methods of undesirable flavors in fish [J]. *Foods*, 2022, 11(16): 2504.
- [28] Wätjen A P, Özmerih S, Shetty R, *et al.* Utilization of plant derived lactic acid bacteria for efficient bioconversion of brewers' spent grain into acetoin [J]. *International Journal of Food Microbiology*, 2023(406): 110400.
- [29] Pan Q, Shao X, Xiao Q, *et al.* Revealing the flavor changes of spiced beef under different thermal treatment temperatures: a complementary approach with GC-IMS and GC-O-MS [J]. *Food Chemistry*, 2025(473): 143074.
- [30] Li Z X, You L Q, Luo R M, *et al.* Analysis of important proteins for flavor formation of Tan sheep meat [J]. *Meat Research*, 2019, 33(5): 7-12. [李子欣, 尤丽琴, 罗瑞明, 等. 滩羊肉风味形成中重要蛋白质的解析 [J]. 肉类研究, 2019, 33(5): 7-12.]
- [31] Zhang C. Effects of exogenous ammonia nitrogen on growth, blood biochemistry, and muscle protein metabolism of juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. [张策. 外源性氨氮处理对草鱼幼鱼生长、血液生化及肌肉蛋白质代谢的影响 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2022.]
- [32] Jin J H, Amenyogbe E, Yang Y, *et al.* Effects of ammonia nitrogen stress on the physiological, biochemical, and metabolic levels of the gill tissue of juvenile four-finger threadfin (*Eleutheronema tetradactylum*) [J]. *Aquatic Toxicology*, 2024(274): 107049.
- [33] Neethling J, Hoffman L C, Muller M. Factors influencing the flavour of game meat: A review [J]. *Meat Science*, 2016(113): 139-153.
- [34] Bian P. Effects of dietary arachidonic acid (20: 4n-6) level on growth performance, fatty acid composition and antioxidant capacity in two economic juvenile marine crabs [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2022. [卞盼. 饲料中添加花生四烯酸(20: 4n-6)对两种经济海水蟹幼蟹生长性能、脂肪酸组成及抗氧化能力的影响 [D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2022.]
- [35] Wu J, Yang D, Du H, *et al.* The influence of dietary arachidonic acid on growth, fatty acid profile and sex steroid hormones of F₂ generation Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*) [J]. *Aquaculture Reports*, 2021(21): 100818.
- [36] Wang A, Liu X, Xu J, *et al.* Arachidonic acid promotes ovarian development by modulating lipid metabolism and steroid hormone secretion in Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. *Aquaculture*, 2025(596): 741844.
- [37] Palmisano B T, Zhu L, Eckel R H, *et al.* Sex differences in lipid and lipoprotein metabolism [J]. *Molecular Metabolism*, 2018(15): 45-55.

COMPARATION ON MUSCLE FLAVOUR QUALITY AND METABOLOMICS OF PENGZE CRUCIAN CARP (*CARASSIUS AURATUS* VAR. PENGZE) UNDER POND AND LAND-BASED ROUND POND CULTURE MODES

JIN Quan^{1,2}, CHEN Zheng¹, WANG Dong-Gen¹, YU Ying-Mei¹, YAN Han¹, SHAO Shan-Shan¹,
HUANG Zheng-Hua¹, WEI Yi-Hua¹, KANG Hao^{1,2}, LI Si-Ming¹ and LI De-Bing²

(1. Institute for Quality & Safety and Standards of Agricultural Products Research, Jiangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanchang 330200, China; 2. Sichuan Agricultural University, College of Animal Science and Technology, Chendu 611130, China)

Abstract: This study aimed to analyze and compare the differences in muscle flavor quality of Pengze crucian carp (*Carassius auratus* var. Pengze) under pond culture and land-based round pond culture modes, and preliminarily investigated the underlying mechanisms using metabolomics. The results showed that compared to the land-based round pond group, the pond culture environment exhibited significantly lower total phosphorus, ammonia nitrogen, and total nitrogen ($P<0.05$) but significantly higher dissolved oxygen ($P<0.05$). The relative content of polyunsaturated fatty acids (PUFAs), particularly linoleic acid, in the muscle was significantly higher in pond-cultured fish ($P<0.05$), while the relative content of monounsaturated fatty acids (MUFAs), especially oleic acid, was significantly lower ($P<0.05$). The umami substances inosine monophosphate (IMP) and guanosine monophosphate (GMP) were both present at higher levels, but no significant intergroup differences were observed ($P>0.05$). GC-MS analysis identified 141 volatile substances in the muscle from both culture modes, with 14 differential volatile substances identified as characteristic flavor markers based on abundance. Among these, 10 substances were significantly upregulated in the land-based round pond group ($P<0.05$), including creamy and fruity aroma compounds as well as high-sensory-threshold acidic off-flavor substances. The overall abundance of volatile substances in the land-based round pond group was significantly higher than that in the pond group ($P<0.05$), accompanied by significantly elevated electronic nose sensor responses. These data suggest that land-based round pond culture may promote the accumulation or synthesis of volatile substances in Pengze crucian carp muscle. Metabolomics analysis revealed 312 differential metabolites between the two groups, with 181 upregulated and 131 downregulated in land-based round pond-cultured fish compared to pond-cultured fish, providing more flavor precursors. KEGG pathway enrichment analysis highlighted steroid hormone biosynthesis and arachidonic acid metabolism as the primary differential metabolic pathways. These findings demonstrate that various environmental factors influence muscle fatty acid composition and metabolites deposition through pathways such as arachidonic acid metabolism and steroid hormone biosynthesis, thereby inducing the formation of differential volatile flavor compounds in fish from the two culture modes.

Key words: Culture modes; Pengze crucian carp; Muscle; Flavor compounds; Metabolomics

附录 1 挥发性物质

Appendix 1 Volatile substances

序号	名称	Compound	CAS	保留时间	保留指数	鉴别	描述
醛类(21)		Aldehydes (21)					
1	乙醛(C)(L)	Acetaldehyde (C)(L)	75-7-0	1.338	834	MS, LRI	pungent, ether
2	己醛(C)(L)	Hexanal(C)(L)	66-25-1	4.199	1067	MS, LRI	grass, tallow, fat
3	trans-2-辛烯醛(C)(L)	trans-2-Octenal (C)(L)	2548-87-0	11.077	1384	MS, LRI	green, nut, fat
4	trans-2-十一烯醛(C)(L)	trans-2-Undecenal (C)(L)	53448-7-0	15.352	1679	MS, LRI	soap, fat, green
5	2, 4-癸二烯醛(C)(L)	2, 4-Decadienal (C)(L)	25152-84-5	16.03	1733	MS, LRI	seaweed
6	十四烷醛(C)(L)	Tetradecanal (C)(L)	124-25-4	17.3	1839	MS, LRI	flower, wax
7	十六醛(C)(L)	Hexadecanal (C)(L)	629-80-1	19.53	2039	MS, LRI	cardboard
8	十八醛(C)(L)	Octadecanal (C)(L)	638-66-4	21.506	2233	MS, LRI	oil
9	cis-9-十六碳烯醛(C)(L)	cis-9-Hexadecenal (C)(L)	56219-4-6	21.709	2254	MS, LRI	
10	戊醛(C)(L)	Valeraldehyde (C)(L)	110-62-3	2.605	972	MS, LRI	almond, malt, pungent
11	十五醛(C)(L)	Pentadecanal (C)(L)	2765-11-9	20.081	2091	MS, LRI	fresh
12	苯甲醛, 4-戊基- (C)	Benzaldehyde, 4-pentyl-(C)	6853-57-2	18.125	1911	MS, LRI	
13	4-乙基苯甲醛(C)	4-Ethylbenzaldehyde (C)	4748-78-1	14.785	1636	MS, LRI	sweet
14	庚醛(L)	Heptanal (L)	111-71-7	6.612	1167	MS, LRI	fat, citrus, rancid
15	cis-7, 10-十六碳二烯醛 (L)	cis,cis-7,10-Hexadecadienal (L)	56829-23-3	16.462	1769	MS, LRI	
16	辛醛(C)(L)	Octanal (C)(L)	124-13-0	8.561	1252	MS, LRI	fat, soap, lemon, green
17	壬醛(C)(L)	Nonanal (C)(L)	124-19-6	10.539	1354	MS, LRI	fat, citrus, green
18	5-甲基-己醛(L)	Hexanal, 5-methyl- (L)	1860-39-5	6.719	1171	MS, LRI	
19	trans-2-庚烯醛(L)	trans-2-Heptenal (L)	18829-55-5	9.55	1298	MS, LRI	green
20	E-4-癸醛(L)	4-Decenal, (E)- (L)	65405-70-1	12.899	1499	MS, LRI	citrus
21	17十八烯醛(L)	17-Octadecenal (L)		20.553	2137	MS, LRI	
酮类(5)		Ketones(5)					
22	2, 5-辛二酮(C)(L)	2, 5-Octanedione (C)(L)	3214-41-3	9.32	1288	MS, LRI	
23	乙偶姻(C)(L)	Acetoin (C)(L)	513-86-0	10.022	1325	MS, LRI	butter, cream
24	羟基丙酮(C)	2-Propanone, 1-hydroxy- (C)	116-9-6	10.156	1332	MS, LRI	
25	3-辛酮, 2-甲基- (C)	3-Octanone, 2-methyl- (C)	923-28-4	9.455	1294	MS, LRI	
26	4-(1, 2-二甲基环戊-2-烯基)-丁-2-酮 (L)	4-(1, 2-Dimethyl-cyclopent-2-enyl)-butan-2-one (L)	75698-6-5	16.86	1801	MS, LRI	
醇类(26)		Alcohols(26)					
27	1-己醇(C)(L)	1-Hexanol (C)(L)	111-27-3	10.389	1346	MS, LRI	resin, flower, green
28	1-辛烯-3-醇(C)(L)	1-Octen-3-ol (C)(L)	3391-86-4	11.657	1420	MS, LRI	mushroom
29	1-庚醇(C)(L)	1-Heptanol (C)(L)	111-70-6	11.775	1427	MS, LRI	chemical, green
30	2, 3-丁二醇(C)(L)	2, 3-Butanediol isomer-1 (C)(L)	513-85-9	13.396	1535	MS, LRI	fruit, onion
31	二甲基硅烷二醇- (C)(L)	Silanediol, dimethyl- (C)(L)	1066-42-8	14.251	1595	MS, LRI	
32	1-壬醇(C)(L)	1-Nonanol (C)(L)	143-8-8	14.369	1604	MS, LRI	fat, green
33	(Z) 3-壬烯-1-醇(C)(L)	3-Nonen-1-ol, (Z)- (C)(L)	10340-23-5	14.66	1626	MS, LRI	
34	2-丙基-1-戊醇甲醚(C)	2-Propyl-1-pentanol, methyl ether (C)		15.684	1705	MS, LRI	
35	2-乙基-1-己醇甲醚(C)	2-Ethyl-1-hexanol, methyl ether (C)	376-98-7	15.693	1706	MS, LRI	
36	乙醇, 1-(2-丁氧基乙氧基)- (C)	Ethanol, 1-(2-butoxyethoxy)- (C)	54446-78-5	15.989	1730	MS, LRI	
37	1-十四烷醇(C)	1-Tetradecanol (C)	112-72-1	14.028	2259	MS, LRI	coconut
38	二环[3.1.1]庚-2-醇, 2, 6, 6-三甲基- (C)	Bicyclo[3.1.1] heptan-2-ol, 2,6,6-trimethyl- (C)	473-54-1	14.095	1584	MS, LRI	
39	2-辛醇, 3-甲基- (C)	2-Octanol, 3-methyl- (C)	27644-49-1	15.71	1707	MS, LRI	
40	4-甲基-2-戊醇- (C)	2-Pentanol, 4-methyl- (C)	108-11-2	14.536	1617	MS, LRI	

续表 1

序号	名称	Compound	CAS	保留时间	保留指数	鉴别	描述
41	trans-2-十二烯-1-醇(C)	trans-2-Dodecen-1-ol (C)	22104-81-0	14.97	1650	MS, LRI	
42	1-氯-3-甲氧基-2-丙醇-(C)	2-Propanol, 1-chloro-3-methoxy- (C)	4151-97-7	15.145	1663	MS, LRI	
43	1-十二烯-3-醇(C)	1-Dodecen-3-ol (C)	4048-42-4	15.39	1682	MS, LRI	
44	(E)-2-十二烯-1-醇(C)(L)	(E)-2-dodecen-1-ol (C)(L)	69064-37-5	16.12	1741	MS, LRI	oil
45	1-辛醇(L)	1-Octanol (L)	111-87-5	13.11	1514	MS, LRI	chemical, metal, burnt
46	1-十六醇(L)	1-Hexadecanol (L)	36653-82-4	15.341	1678	MS, LRI	wax, flower
47	9, 12-十八碳二烯-1-醇, (Z, Z)- (L)	9, 12-Octadecadien-1-ol, (Z,Z)- (L)	506-43-4	22.274	2312	MS, LRI	
48	1-戊醇(L)	1-Pentanol (L)	71-41-0	8.561	1252	MS, LRI	balsamic
49	(E)-2-辛烯-1-醇(L)	(E)-2-Octen-1-ol (L)	18409-17-1	13.845	1567	MS, LRI	citrus
50	2-辛烯-1-醇, (Z)- (L)	2-Octen-1-ol, (Z)- (L)	26001-58-1	13.88	1569	MS, LRI	flowery
51	2, 4-二烯-1-醇, (E, E)- (L)	2, 4-Decadien-1-ol, (E,E)- (L)	18409-21-7	18.095	1908	MS, LRI	fatty, citrus
52	3, 6, 9, 12-四氧杂十四烷-1-醇 (L)	3, 6, 9, 12-Tetraoxatetradecan-1-ol (L)	5650-20-4	22.05	2289	MS, LRI	
酸类(15)		Acid(15)					
53	醋酸(C)(L)	Acetic acid (C)(L)	64-19-7	11.833	1431	MS, LRI	sour
54	甲酸(C)(L)	Formic acid (C)(L)	64-18-6	12.456	1471	MS, LRI	
55	庚烯酸(C)	Heptanoic acid (C)	111-14-8	16.47	1769	MS, LRI	
56	苯甲酸(C)(L)	Benzoic acid (C)(L)	65-85-0	22.063	2290	MS, LRI	urine
57	月桂酸(C)(L)	Lauric acid (C)(L)	143-7-7	22.563	2343	MS, LRI	metal
58	十四烷酸(C)(L)	Tetradecanoic acid (C)(L)	544-63-8	24.275	2532	MS, LRI	
59	十五烷酸(C)(L)	Pentadecanoic acid (C)(L)	1002-84-2	25.971	2721	MS, LRI	wax
60	十八烷酸(C)(L)	Octadecanoic acid (C)(L)	57-11-4	28.313	2924	MS, LRI	
61	油酸(C)(L)	Oleic acid (C)(L)	112-80-1	28.721	2953	MS, LRI	fat
62	3-甲基丁酸- (C)	Butanoic acid, 3-methyl- (C)	503-74-2	14.501	1614	MS, LRI	
63	己酸(C)(L)	Capronic acid (C)(L)	142-62-1	16.472	1770	MS, LRI	sweat
64	dl-丙氨酸(C)	dl-Alanine (C)	302-72-7	3.215	1018	MS, LRI	
65	丁酸(C)	Butyric acid (C)	107-92-6	14.088	1584	MS, LRI	rancid, cheese, sweat
66	4-甲基-2-氧代戊酸(C)	4-Methyl-2-oxovaleric acid (C)	816-66-0	14.865	1642	MS, LRI	
67	11, 14-二十碳二烯酸(L)	11, 14-Eicosadienoic acid (L)	2091-39-6	29.521	3009	MS, LRI	
酯类(45)		Esters(45)					
68	甲酸辛酯(C)(L)	Formic acid, octyl ester (C)(L)	112-32-3	13.108	1514	MS, LRI	
69	肉豆蔻酸乙酯(C)(L)	Ethyl myristate (C)(L)	124-6-1	18.718	1964	MS, LRI	ether
70	9-十六烯酸乙酯(C)(L)	Ethyl 9-hexadecenoate (C)(L)	54546-22-4	20.94	2176	MS, LRI	
71	庚二酸乙酯(C)(L)	Heptadecanoic acid, ethyl ester (C)(L)	14010-23-2	21.195	2201	MS, LRI	
72	乙酸亚油酸酯(C)(L)	Linoleyl acetate (C)(L)	5999-95-1	21.271	2209	MS, LRI	
73	硬脂酸乙酯(C)(L)	Ethyl stearate (C)(L)	111-61-5	22.515	2338	MS, LRI	wax
74	(E)-9-十八烯酸乙酯(C)(L)	(E)-9-Octadecenoic acid ethyl ester (C)(L)	6114-18-7	22.679	2355	MS, LRI	
75	9, 12-十八碳二烯酸乙酯 (C)(L)	9, 12-Octadecadienoic acid, ethyl ester (C)(L)	544-35-4	23.181	2409	MS, LRI	fruity
76	(all-Z) 9, 12, 15-十八碳三烯酸甲酯(C)(L)	9, 12, 15-Octadecatrienoic acid, methyl ester, (Z, Z, Z)- (C)(L)	301-0-8	23.598	2456	MS, LRI	
77	cis-5, 8, 11-二十碳三烯酸甲酯(C)	cis-5, 8, 11-Eicosatrienoic acid, methyl ester (C)	14602-39-2	24.731	2584	MS, LRI	
78	(all-Z) 9, 12, 15-十八碳三烯酸乙酯(C)(L)	9, 12, 15-Octadecatrienoic acid, ethyl ester, (Z, Z, Z)- (C)(L)	1191-41-9	24.922	2606	MS, LRI	

续表 1

序号	名称	Compound	CAS	保留时间	保留指数	鉴别	描述
79	花生四烯酸乙酯 (C)(L)	5, 8, 11, 14-Eicosatetraenoic acid, ethyl ester, (all-Z)-(C)(L)	1808-26-0	25.08	2624	MS, LRI	
80	己二酸双(2-乙基己基)酯 (C)(L)	Hexanedioic acid, bis(2-ethylhexyl) ester (C)(L)	103-23-1	25.4	2660	MS, LRI	
81	4, 7, 10, 13, 16-二十二碳五烯酸甲酯(C)(L)	Methyl 4, 7, 10, 13, 16-docosapentaenoate (C)(L)	31930-67-3	27.318	2845	MS, LRI	
82	(Z)-18-十八碳-9-烯内酯(C)	(Z)-18-Octadec-9-enolide (C)	80060-76-0	29.511	3009	MS, LRI	
83	9-氧代壬酸乙酯(C)(L)	Nonanoic acid, 9-oxo-, ethyl ester (C)(L)	3433-16-7	19.056	1995	MS, LRI	
84	15-甲基十六烷酸乙酯(C)	Ethyl 15-methyl-hexadecanoate (C)		21.196	2201	MS, LRI	
85	(Z)-十七烷-9-烯酸乙酯 (C)(L)	(Z)-Ethyl heptadec-9-enoate (C)(L)	1089325-29-0	21.822	2265	MS, LRI	
86	十六烷酸丁酯(C)(L)	Hexadecanoic acid, butyl ester (C)(L)	111-6-8	22.294	2314	MS, LRI	
87	(E) 9-十八烯酸甲酯(C)(L)	9-Octadecenoic acid, methyl ester, (E)-(C)(L)	1937-62-8	22.376	2323	MS, LRI	
88	(all-Z) 4, 7, 10, 13, 16, 19-二十二碳六烯酸甲酯(C)(L)	4, 7, 10, 13, 16, 19-Docosahexaenoic acid, methyl ester, (all-Z)- (C)(L)	2566-90-7	28.155	2913	MS, LRI	
89	甲氧基乙酸, 3-十四烷基酯 (C)	Methoxyacetic acid, 3-tetradecyl ester (C)	6290-49-9	13.617	1550	MS, LRI	
90	月桂酸乙酯(C)(L)	Ethyl laurate (C)(L)	106-33-2	16.534	1775	MS, LRI	flowery
91	甲基γ-亚麻酸酯(C)(L)	Methyl.gamma.-linolenate (C)(L)	16326-32-2	23.3	2422	MS, LRI	
92	(all-Z)-6, 9, 15-十八碳三烯酸甲酯 (C)	(Z, Z, Z)-6, 9, 15-Octadecatrienoic acid methyl ester (C)	864293-46-9	15.603	2584	MS, LRI	
93	(all-Z) 5, 8, 11, 14, 17-二十碳五烯酸甲酯-(C)(L)	5, 8, 11, 14, 17-Eicosapentaenoic acid, methyl ester, (all-Z)- (C)(L)	2734-47-6	25.631	2686	MS, LRI	
94	氯乙酸壬酯(C)	Chloroacetic acid, nonyl ester (C)	5451-96-7	14.395	1606	MS, LRI	
95	cis-11, 14-二十碳二烯酸甲酯(C)(L)	cis-11,14-Eicosadienoic acid, methyl ester (C)(L)		29.521	3009	MS, LRI	
96	甲酸2-丙基戊酯(L)	Formic acid, 2-propylpentyl ester (L)		15.685	1705	MS, LRI	
97	十五烷酸乙酯(L)	Pentadecanoic acid, ethyl ester (L)	41114-0-5	19.747	2060	MS, LRI	
98	9, 12-十八碳二烯酸(Z, Z)-甲酯 (L)	9, 12-Octadecadienoic acid (Z, Z)-, methyl ester (L)	112-63-0	22.275	2312	MS, LRI	
99	10, 13-二十碳二烯酸甲酯 (L)	10, 13-Eicosadienoic acid, methyl ester (L)	30223-50-8	24.721	2583	MS, LRI	
100	6, 9, 12, 15-十八碳四烯酸丁酯(L)	Butyl 6, 9, 12, 15-octadecatetraenoate (L)	73097-00-4	23.835	2666	MS, LRI	
101	n-己酸乙烯酯 (L)	n-Caproic acid vinyl ester (L)	3050-69-9	14.091	1584	MS, LRI	
102	cis-7, 10, 13, 16-二十二碳四烯酸甲酯(L)	cis-7, 10, 13, 16-Docosatetraenoic acid, methyl ester (L)	13487-42-8	20.497	2132	MS, LRI	
103	9, 12-十六碳二烯酸乙酯(L)	Ethyl 9, 12-hexadecadienoate (L)		21.575	2228	MS, LRI	
104	十八烷酸丁酯 (L)	Octadecanoic acid, butyl ester (L)	123-95-5	23.987	2499	MS, LRI	
105	棕榈酸甲酯 (L)	Methyl palmitate (L)	112-39-0	20.357	2118	MS, LRI	
106	9-十八烯酸, 12-羟基-乙酯, [R-(Z)]- (L)	9-Octadecenoic acid, 12-hydroxy-, ethyl ester, [R-(Z)]-(L)	55066-53-0	18.865	1978	MS, LRI	
107	2-羟基丙酸乙酯 (L)	Propanoic acid, 2-hydroxy-, ethyl ester (L)	97-64-3	10.005	1323	MS, LRI	fruity
108	辛酸乙酯 (L)	Ethyl octanoate (L)	106-32-1	11.46	1407	MS, LRI	fruity
109	辛硫磺S-丙酯 (L)	Hexanethioic acid, S-propyl ester (L)	2432-78-2	14.09	1584	MS, LRI	
110	cis-9-十四烯酸庚酯 (L)	cis-9-Tetradecenoic acid, heptyl ester (L)		19.115	2000	MS, LRI	
111	10, 13, 16-二十二碳三烯酸甲酯 (L)	Methyl 10, 13, 16-docosatrienoate (L)		24.92	2606	MS, LRI	

续表 1

序号	名称	Compound	CAS	保留时间	保留指数	鉴别	描述
112	癸酸乙酯 (L)	Ethyl decanoate (L)	110-38-3	14.178	1590	MS, LRI	fruity
113	棕榈酸乙酯 (C)(L)	Ethyl palmitate (C)(L)	628-97-7	20.712	2154	MS, LRI	
烷烃(7)		Alkane(7)					
114	二十八烷(C)(L)	Eicosane (C)(L)	112-95-8	14.831	1639	MS, LRI	alkane
115	环氧乙烷(C)	Ethylene oxide (C)	75-21-8	1.34	835	MS, LRI	
116	2, 5-二羟基庚烷(C)	2, 5-Dihydroxyheptane (C)	70444-25-6	14.887	1644	MS, LRI	
117	二环[2.2.1]庚烷, 2-(1-甲基丙基)- (C)(L)	Bicyclo[2.2.1] heptane, 2-(1-methylpropyl)- (C)(L)	74663-93-7	16.936	1808	MS, LRI	
118	三十烷(L)	Triacontane (L)	638-68-6	22.894	2378	MS, LRI	
119	角鲨烷(L)	Squalane (L)	111-1-3	15.907	1723	MS, LRI	
120	庚烷(L)	Heptadecane (L)	629-78-7	15.02	1654	MS, LRI	
胺类(4)		Amines(4)					
121	1-丙氨酸乙酰胺, (S)- (C)(L)	1-Alanine ethylamide, (S)- (C)(L)	71773-95-0	1.327	833	MS, LRI	
122	2-丁烯-1-胺, N-丁基, (E)- (C)	2-Buten-1-amine, N-butyl-, (E)- (C)	62337-86-4	15.431	1685	MS, LRI	
123	2-(2, 6-二甲苯基氧基)-N-甲基乙胺- (C)	Ethanamine, 2-(2, 6-dimethylphenoxy)-N-methyl- (C)	14573-22-9	1.515	854	MS, LRI	
124	甲胺, N, N-二甲基- (C)	Methylamine, N, N-dimethyl- (C)	75-50-3	3.635	1039	MS, LRI	
烯烃(3)		Alkenes(3)					
125	环戊烯, 5-己基-3, 3-二甲基- (C)(L)	Cyclopentene, 5-hexyl-3, 3-dimethyl- (C)(L)	61142-66-3	16.979	1812	MS, LRI	
126	7-庚二烯, 1-氯- (C)	7-Heptadecene, 1-chloro- (C)	56554-78-0	21.76	2259	MS, LRI	
127	1, 3-己二烯, 3-乙基-2-甲基- (L)	1, 3-Hexadiene, 3-ethyl-2-methyl- (L)	61142-36-7	11.057	1383	MS, LRI	
其它(14)		Others (14)					
128	N-羟基苯甲亚胺酸甲酯 (C)(L)	Oxime-, methoxy-phenyl- (C)(L)	1562924-97-3	15.575	1696	MS, LRI	
129	9-二十碳炔 (C)	9-Eicosyne (C)	71899-38-2	18.53	1947	MS, LRI	
130	苯并噻唑 (C)	Benzothiazole (C)	95-16-9	17.64	1868	MS, LRI	gasoline, rubber
131	甲基胂- (C)	Hydrazine, methyl- (C)	60-34-4	2.175	925	MS, LRI	
132	氨基胂(C)	Semicarbazide (C)	4426-72-6	1.581	861	MS, LRI	
133	萘, 十氢-1, 6-二甲基- (L)	Naphthalene, decahydro-1,6-dimethyl- (L)	1750-51-2	16.089	1738	MS, LRI	
134	氨基甲酸单铵盐(C)(L)	Carbamic acid, monoammonium salt (C)(L)	1111-78-0	1.183	818	MS, LRI	
135	二甲醚(C)(L)	Dimethyl ether (C)(L)	115-10-6	2.505	961	MS, LRI	
136	丙烷, 2-(乙烯氧基)- (C)(L)	Propane, 2-(ethenyloxy)- (C)(L)	926-65-8	2.601	971	MS, LRI	
137	缩水甘油醚 (C)	Glycidol (C)	556-52-5	1.341	835	MS, LRI	
138	5-十二烷基二氢呋喃酮- (C)(L)	2(3H)-Furanone, 5-dodecyldihydro- (C)(L)	730-46-1	25.365	2656	MS, LRI	
139	2-戊基呋喃 (L)	2-Pentylfuran (L)	3777-69-3	7.445	1199	MS, LRI	green bean, butter
140	三氟乙酸2-乙基-1-己醇 (L)	2-Ethyl-1-hexanol, trifluoroacetate (L)		15.675	1704	MS, LRI	
141	2-丙氧基乙胺- (L)	Ethanamine, 2-propoxy- (L)	42185-3-5	2.605	972	MS, LRI	

注: 表中化合物名称后(C)代表在池塘养殖中检测出该种化合物, (L)代表在陆基圆池养殖模式中检测出该种化合物

Note: (C) after the compound name in the table represents the detection of the compound in pond aquaculture, and (L) represents the detection of the compound in land-based circular pond aquaculture mode

附录 2 不同养殖模式彭泽鲫挥发性物质的表达丰度(面积)

Appendix 2 Expression abundance (area) of volatile compounds in Pengze crucian carp between two culture modes

名称	池塘养殖	陆基圆池养殖
乙醛	1133466±290135	873951±601634
己醛	3612110±862991	2522194±428473
乙偶姻	8770568±2855291 ^b	20460492±2797683 ^a
羟基丙酮	ND	518754±133236
1-己醇	5572684±1530668	5317794±1500158
1-辛烯-3-醇	1581555±343206	1168425±88071
醋酸	5619297±2135389 ^b	15154299±1100216 ^a
2, 3-丁二醇	26001117±8655596	49376751±6385091
1-壬醇	959879±58355	2456767±1533034
N-羟基苯甲亚胺酸甲酯	5528623±1650454	9103958±3030651
2, 4-癸二烯醛	494885±135170	780838±354383
十四烷醛	463361±52226	550086±173576
肉豆蔻酸乙酯	3504018±566094 ^a	1726329±313390 ^b
十六烷醛	3541618±372027	3593096±768978
9-十六烯酸乙酯	4641588±1584781 ^b	9827609±1573694 ^a
乙酸亚油酸酯	634304±72617	526432±79383
十八醛	504531±96895	639466±139297
(E)-9-十六碳烯醛	812557±138614	1163901±142351
硬脂酸乙酯	2034826±214337	1910678±275698
月桂酸	2865651±524542 ^a	575401±96911 ^b
(E)-9-十八烯酸乙酯	34657611±6329414	39167551±4189332
9, 12-十八碳二烯酸乙酯	58543331±4617996	44520229±4659178
(all-Z) 9, 12, 15-十八碳三烯酸甲酯	4159653±395513 ^a	2942838±330665 ^b
十四烷酸	2356381±305793	2737777±177783
(all-Z) 9, 12, 15-十八碳三烯酸乙酯	2364507±249475	2177074±266756
花生四烯酸乙酯	5030131±729718 ^b	8388837±1088350 ^a
十五烷酸	11370772±2939866 ^b	29636564±4208100 ^a
油酸	1517005±551139 ^b	6121776±1181618 ^a
(Z)-18-十八碳-9-烯内酯	ND	3152488±522934
(Z)-十七烷-9-烯酸乙酯	1409450±89590	1085181±261625
(all-Z) 4, 7, 10, 13, 16, 19-二十二碳六烯酸甲酯	929645±173358	1256772±245504
壬醛	1725849±415836	3752367±1575811
月桂酸乙酯	5882880±422726	ND
甲基γ-亚麻酸酯	965096±107873 ^b	1718883±237503 ^a
十五醛	726752±77381 ^a	295833±28004 ^b
棕榈酸乙酯	25992960±2738364	22471117±3141284

注: 表中ND代表没有检测到, 同一行右上角不同字母代表差异显著, $P<0.05$, $n=6$ Note: ND in the table represents not detected, while different superscript letters in the same row represent significant differences, $P<0.05$, $n=6$