

不同养殖模式对鲫鱼(*Carassius auratus*)营养品质及特征风味的影响研究*

韦毓¹ 翁旭东² 于瑾^{1,3①} 高阳¹ 应晓国¹
余林¹ 胡家杰¹ 曾妮³

(1. 浙江海洋大学食品与药学学院 浙江舟山 316022; 2. 浙江渔老大农业科技有限公司 浙江衢州 324400; 3. 龙游县农业农村局养殖业发展中心 浙江衢州 324400)

摘要 为研究池塘内循环流水养殖与传统池塘养殖模式条件下鲫鱼的营养品质及特征风味,对鲫鱼形体、基础营养成分、蒸煮损失和持水力、肌肉蛋白质消化率、氨基酸、脂肪酸和挥发性化合物含量等指标进行分析评价。结果表明:跑道组和池塘组鲫鱼的形体指标和基础营养成分具有较大差异,其中跑道组具有高蛋白低脂肪的特点。同时两种养殖模式下鲫鱼的蒸煮损失和持水力相接近。跑道组鲫鱼蛋白质消化率显著高于池塘组鲫鱼($P<0.05$)。游离氨基酸分析结果表明跑道组鲫鱼中鲜味氨基酸(天冬氨酸和谷氨酸)和甜味氨基酸(谷氨酸和丙氨酸等)含量均显著高于池塘组($P<0.05$),因此跑道组鲫鱼可能具有更佳的风味。此外两种养殖模式下鲫鱼肌肉氨基酸组成无显著差异($P<0.05$),然而跑道组鲫鱼不饱和脂肪酸含量(4.803 8 g/100 g)高于池塘组(1.411 1 g/100 g)。基于 GC-IMS 结果可知,两种养殖模式下鲫鱼的挥发性化合物具有显著差异。通过层次聚类热图分析从 57 种挥发性化合物中筛选出了 33 种特性差异标记物用以区分不同养殖模式下的鲫鱼。研究结果表明,池塘内循环流水跑道养殖在一定程度上对鲫鱼营养品质和特征风味有所改善,可以通过 GC-IMS 技术进行有效快速鉴别,同时阐明了风味感官差异的物质基础,为淡水鱼养殖模式选择和产品定位提供理论基础。

关键词 池塘内循环流水养殖模式;传统池塘养殖模式;跑道养殖模式;鲫鱼;营养品质;风味
中图分类号 S965.117 doi: 10.11693/hyhz20230800171

我国是水产养殖大国,其中淡水鱼产量在全球占主导地位(蔡振鑫等, 2021)。鲫鱼(*Carassius auratus*)作为我国重要养殖的经济淡水鱼种,其因鲜美细嫩的肉质和丰富的营养价值而深受消费者喜爱。鲫鱼的养殖方式通常为传统池塘养殖,即“三塘合一”的生态系统模式,该模式下鱼类生存环境、天然饵料生产基地、有机物分解场所均为一处,因而常出现水体富营养化、养殖系统失衡等问题(刘凯等, 2021)。近年来,池塘内循环流水跑道养殖模式逐步兴起,跑道养殖是一种将池塘分为推水区、养殖区和净化区的高效养殖模式,其中推水区主要利用机械装置使养殖水体

处于循环流水状态(贾丽等, 2011; 李倩等, 2020)。同时相较于传统池塘养殖,具有资源节约、循环生态的优势,还能使养殖对象较高效的吸收利用氮磷(刘梅等, 2021),该模式有望解决传统池塘养殖所存在的部分问题。

不同养殖方式对鱼类营养品质和风味会产生一定影响。根据研究报告(朱士臣等, 2021; 黄爱霞等, 2021; 李敏等, 2022)可知,跑道养殖模式可改善青鱼、梭鱼、三角鲂等的营养品质和风味口感,从而提高了消费者的可接受度和鱼类价值。刘梅等(2019)的研究指出,通过调节水流速度可以改变鱼的运动状

* 浙江省科学技术厅资助项目, 2023C02006 号。韦毓, 硕士研究生, E-mail: weiyuweiyu07@163.com

通信作者: 于瑾, 高级工程师, E-mail: Z18858398133@163.com

收稿日期: 2023-08-23, 收修改稿日期: 2023-11-26

态、影响脂肪沉积等指标,而跑道养殖模式对黄颡鱼生长性能、形体指标、血清生化指标及肌肉营养成分均具有改善作用。目前,关于跑道养殖和池塘养殖模式对鲫鱼营养品质和特征风味影响研究较少。

因此,本研究对跑道养殖和传统池塘养殖模式下的鲫鱼形体、基础营养成分、蒸煮损失和持水力、氨基酸、脂肪酸、肌肉蛋白质消化率和挥发性化合物等指标进行研究比较,旨在探究养殖方式对鲫鱼营养品质及特征风味的影响,以期在选择适宜养殖模式、提高鲫鱼质量及快速鉴别鲫鱼的养殖模式提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

实验材料:鲫鱼购自衢州龙游龙和渔业养殖基地(119°178339'E, 29°000213'N)。鲫鱼来自同一批次健康幼鱼,分别投入两组池塘(传统养殖池塘和内循环流水养殖系统池塘),期间投喂统一配方的饲料,养殖6个月后,随机从两种养殖模式中取体型完整、灵敏健康的鲫鱼各6尾,活体运送至实验室,分别命名为跑道组[体重(390.32±76.02)g,体长(29.08±1.91)cm]和池塘组[体重(282.68±27.55)g,体长(25.22±0.84)cm]。

实验试剂:双缩脲试剂盒,南京建成生物工程研究所;胃蛋白酶(猪胃黏膜),上海瑞永生物科技有限公司;胰蛋白酶(猪胰),上海瑞永生物科技有限公司;其他试剂均为分析纯,国药集团化学试剂公司。

1.2 仪器与设备

脂肪测定仪 SZT-06A,苏州市天威仪器有限公司;恒温振荡器 THZ-98A,上海一恒科学仪器有限公司;高速离心机 Multifuge X1R,美国 ThermoFisher Scientific 公司;日立 L-8900 型氨基酸全自动分析仪,日本日立高新技术公司;Agilent6890 型气相色谱仪,美国安捷伦科技公司;FlavourSpec® GC-IMS,德国 G.A.S 公司。

1.3 实验方法

1.3.1 样品处理 分别测量两者鱼体长度和质量,随后解剖鱼体取出内脏(主要为肝脏)并称量,以计算脏体比,肝体比和肥满度。最后,鱼胴体洗净后置于4℃冰箱备用。

1.3.2 基础营养成分含量测定 水分含量的测定采用《GB 5009.3-2016》中的直接干燥法进行;粗脂肪含量的测定采用《GB 5009.6-2016》中的索氏抽提法进行;粗灰分含量的测定采用《GB 5009.4-2016》中的马弗炉高温灼烧法进行。总蛋白含量测定采用南

京建成生物工程研究所双缩脲试剂盒。

1.3.3 蒸煮损失和持水力

蒸煮损失:将鱼肉斩拌后准确称取质量,记为 W_1 ,放入蒸煮袋后密封,将其置于90℃恒温水浴中加热10min,取出放置恢复至室温后,用滤纸吸干样品表面水分称重,记为 W_2 。蒸煮损失按公式(1)计算:

$$\text{蒸煮损失} = (W_1 - W_2) / W_1 \times 100\% \quad (1)$$

持水力:将鱼肉斩拌后准确称取质量,记为 W_3 ,将其用三层滤纸包裹后放入50mL干燥离心管中,使样品在4℃下5000×g离心15min,离心结束后,取出样品称重,记为 W_4 。持水力测定按公式(2)计算:

$$\text{持水力} = W_4 / W_3 \times 100\% \quad (2)$$

1.3.4 蛋白质消化率

胃消化率:测定方法参照孙立春等(2012)等报道并作适当修改。鱼肉被切碎混匀后,称取3g样品(记为 m_0)于锥形瓶中,加入20mL的模拟胃液,将样品置于37℃恒温振荡摇床上100r/min反应4h,模拟胃蠕动,反应结束后,加入1mL Na₂CO₃ (1mol/L)溶液终止酶反应。消化液在105℃烘箱中烘干至恒重,称量干质量(m_1)。体外胃蛋白酶消化率按公式(3)计算:

$$\text{体外胃蛋白酶消化率}(\%) = (m_0 - m_1) / m_0 \times 100 \quad (3)$$

肠消化率:测定参照孙立春等(2012)的报道并作适当修改。鱼肉切碎混匀后,称取3g样品(记为 m_2)于锥形瓶中,加入20mL模拟肠液,将样品置于37℃恒温振荡摇床上100r/min反应4h,模拟肠道蠕动反应结束后,加入1mL 1mol/L Na₂CO₃ 溶液终止酶反应。消化液在105℃恒温干燥箱中烘干至恒重,称量干质量(m_3)。体外胰蛋白酶消化率按公式(4)计算:

$$\text{体外胰蛋白酶消化率}(\%) = (m_2 - m_3) / m_2 \times 100 \quad (4)$$

1.3.5 氨基酸和脂肪酸 采用氨基酸自动分析仪测定氨基酸含量(GB 5009.124-2016);采用气相色谱仪测定脂肪酸含量(GB 5009.168-2016)。

1.3.6 GC-IMS 分析参数 样品预处理方法:取3g鱼肉样品,置于20mL顶空进样瓶中,45℃保持20min后进样,每个样品重复3次。

GC-IMS 分析方法:通过 FlavourSpec®风味分析仪测定样品挥发性组分。MXT-WAX 色谱柱(30m×0.53mm×1μm),柱温60℃,IMS检测温度为45℃,分析时间35min,载气/漂移气为纯度99.999%的氮气。漂移气流量为150mL/min,载气初始流量为2.0mL/min保持2min,在10min流速线性增加至10mL/min,最后在35min内线性增加至100mL/min。

GC-IMS 分析获得风味成分的峰强度通过 Origin 软件采用 Euclidean 最短距离进行聚类分析。

1.4 实验数据处理及分析

采用 Excel 整理实验数据, Origin 绘图, SPSS 27 进行数据分析, 层次聚类分析使用 MetaboAnalyst 5.0 (<https://www.metaboanalyst.ca/>)进行。实验结果以平均值±标准差表示。使用 *t* 检验来评估变量之间的差异, $P < 0.05$ 表示差异性显著。

2 结果与分析

2.1 形态学指标

不同养殖模式下鲫鱼各项形态学指标如表 1 所示。鱼的形态指标在一定程度上能够反映鱼类的感官特性和营养状态。其中脏体比可体现出鱼体内可食用部分的多少, 肝体比可体现出鱼体的健康程度, 肥满度可体现出鱼类的肥瘦程度和生长情况(史庆超等, 2021), 且以上指标皆与鱼体内脂肪的积累有关。两组鲫鱼样品中脏体比与肥满度虽差异不显著($P > 0.05$), 但跑道组都略低于池塘组, 且跑道组肝体比显著($P < 0.05$)低于池塘组肝体比。因此结果表明跑道组鲫鱼体内脂肪含量较少、可食用部分比例更低, 其原因可能是在跑道养殖模式中所采用的气提式增氧推水装置可使鱼长期处于流水富氧的生长环境中, 运动量较池塘养殖鲫鱼更大。

表 1 形态学指标比较
Tab.1 Comparison of morphological indicators

模式	脏体比/%	肝体比/%	肥满度
跑道组	13±1 ^a	3±0.5 ^a	0.016±0.002 ^a
池塘组	14±1 ^a	5±1 ^b	0.018±0.001 ^a

注: 同一列标注不同字母表示差异性显著($P < 0.05$)

2.2 基础营养成分含量分析

不同养殖模式下鲫鱼中基础营养成分含量如表 2 所示。池塘组和跑道组的鲫鱼水分和灰分含量差异显著($P < 0.05$)。跑道组粗脂肪含量明显低于池塘组($P < 0.05$), 而蛋白含量明显高于池塘组($P < 0.05$)。这可能由于在池塘内循环养殖的水流作用下, 鲫鱼需要消耗更多的能量来应对运动量的增加, 因此机体的脂肪被分解利用, 从而脂肪含量降低(董立学等, 2021)。有研究报道(Zhang *et al.*, 2021), 运动训练可促进蛋白质在肌肉中的沉积, 跑道组鲫鱼蛋白含量高于池塘组也印证了这一点。由此可知, 跑道模式养殖鲫鱼更符合人们对鱼肉高蛋白低脂肪健康食品的追求。

表 2 基础营养成分含量比较
Tab.2 Comparison of basic nutrient contents

模式	水分/%	灰分/%	粗脂肪/%	总蛋白/%
跑道组	76.33±0.21 ^b	0.94±0.01 ^a	6.47±0.11 ^b	13.57±0.52 ^a
池塘组	77.35±0.17 ^a	0.83±0.02 ^b	9.13±0.08 ^a	11.57±0.74 ^b

注: 同一列标注不同字母表示差异性显著($P < 0.05$)

2.3 蒸煮损失和持水力分析

通过蒸煮损失和持水力的测定, 可以反映该鱼肉的保水性能。如图 1 所示, 两组鲫鱼在蒸煮测试中质量都有所损失, 其原因是鱼肉蛋白质的热变性, 导致肌纤维的收缩和内部水分向外迁移(Vaskoska *et al.*, 2021)。此外, 有研究表明运动可以增加肌纤维的密度和直径从而减少离心失水率(Cai *et al.*, 2023), 两组鲫鱼持水力变化符合这一说法。以上表明两种养殖模式下鲫鱼的蒸煮损失、持水力变化较为接近。

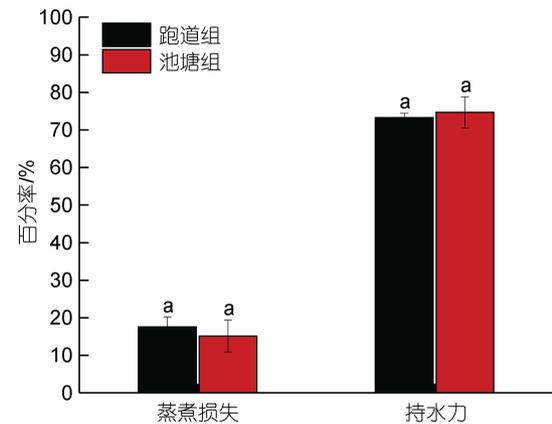


图 1 蒸煮损失和持水力比较

Fig.1 Comparison of cooking loss and water holding capacity

注: 相同字母表示无显著差异($P > 0.05$)

2.4 蛋白质消化特性

如图 2 所示, 跑道组鲫鱼肌肉模拟胃消化率为 73.92%、肠消化率 65.57%, 显著高于池塘组肌肉模拟胃消化率 69.77%、肠消化率 61.85% ($P < 0.05$)。食物中的蛋白质先在胃中被胃蛋白酶初步水解, 然后进入小肠, 在胰蛋白酶的作用下进一步被水解为小分子肽及游离氨基酸, 最终被肠壁吸收。有研究(Ding *et al.*, 2022)表明, 脂肪通过小肠的机械蠕动能被乳化成乳状液的形式从而被吸收, 该类乳状液的结构主要由其脂肪相、界面和水相的性质所决定, 当脂肪含量过高时, 部分蛋白质被吸附在油水界面上, 会进一步降低蛋白质的分散程度而影响吸收。本研究中, 跑道组鲫鱼的脂肪含量低于池塘组, 在消化过程中其蛋

白质可能较少被吸附,更大程度地被酶水解,进而促进消化吸收,因此跑道组鲫鱼蛋白质消化率呈现出高于池塘组的趋势。

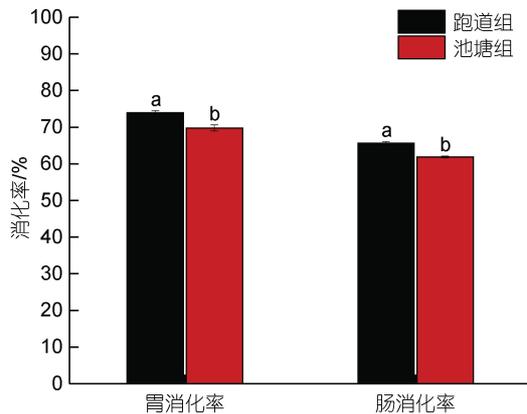


图 2 肌肉蛋白质消化特性比较

Fig.2 Comparison of muscle protein digestion characteristics
注: 不同字母表示有显著差异($P<0.05$)

2.5 氨基酸组成及含量分析

2.5.1 游离氨基酸 由表 3 可知,两种养殖模式的鲫鱼肌肉中共检测到了 13 种游离氨基酸,其中池塘组未检出游离脯氨酸。游离氨基酸对肉类食品的风味和品质有重要影响,目前认为影响鱼肉鲜美的氨基酸主要为天冬氨酸、甘氨酸、谷氨酸、丙氨酸和组氨酸等,它们的含量决定了对风味的影响程度(李双琦等, 2022)。本实验中跑道组的大部分游离氨基酸含量高于池塘组,其中鲜味氨基酸(天冬氨酸和谷氨酸)和甜味氨基酸(丙氨酸和谷氨酸)等呈味氨基酸含量显著高于池塘组($P<0.05$)。两组鲫鱼的大部分苦味氨基酸(亮氨酸、异亮氨酸、缬氨酸和组氨酸)含量无显著差异($P>0.05$),但池塘组鲫鱼赖氨酸含量显著高于跑道组鲫鱼($P<0.05$),而跑道组鲫鱼精氨酸含量显著高于池塘组鲫鱼($P<0.05$),因此两组鲫鱼整体所呈现的氨基酸苦味差距较小。总体而言,跑道模式养殖鲫鱼呈现鲜甜味的氨基酸含量更显著,故相比池塘养殖鲫鱼可能具有更好地风味。

2.5.2 水解氨基酸 由表 4 可知,跑道组鲫鱼和池塘组鲫鱼均检出了 17 种氨基酸,其中必需氨基酸 7 种,半必需氨基酸 5 种,非必需氨基酸 5 种。两组鲫鱼肌肉所含的氨基酸在组成上相对平衡,含量无显著差异($P>0.05$)。在必需氨基酸中亮氨酸和赖氨酸的含量相对较高,半必需氨基酸中甘氨酸和精氨酸的含量相对较高,此外非必需氨基酸中天冬氨酸和谷氨酸的含量相对较高。根据 FAO/WHO 的理想蛋白质

表 3 游离氨基酸含量比较

氨基酸名称	跑道组质量分数/(g/kg)	池塘组质量分数/(g/kg)
天冬氨酸 Asp [▲]	0.11±0.02 ^a	0.032±0.006 ^b
谷氨酸 Glu [▲]	0.2±0.04 ^a	0.053±0.01 ^b
苏氨酸 Thr [△]	0.16±0.01 ^a	0.079±0.01 ^b
脯氨酸 Pro [△]	0.014±0.002 ^a	ND ^b
丙氨酸 Ala [△]	0.2±0.02 ^a	0.14±0.03 ^b
甘氨酸 Gly [△]	0.26±0.02 ^b	0.55±0.02 ^a
丝氨酸 Ser [△]	0.11±0.03 ^a	0.054±0.01 ^b
亮氨酸 Leu [•]	0.13±0.02 ^a	0.12±0.03 ^a
异亮氨酸 Ile [•]	0.03±0.01 ^a	0.016±0.01 ^a
缬氨酸 Val [•]	0.073±0.01 ^a	0.052±0.01 ^a
赖氨酸 Lys [•]	0.21±0.04 ^b	0.37±0.03 ^a
组氨酸 His [•]	2.1±0.3 ^a	1.5±0.3 ^a
精氨酸 Arg [•]	0.17±0.02 ^a	0.096±0.01 ^b

注: ▲表示鲜味氨基酸; △表示甜味氨基酸; •表示苦味氨基酸; ND 表示未检出。同一行字母不同表示差异性显著($P<0.05$)

表 4 水解氨基酸含量比较

氨基酸名称	跑道组质量分数/(g/100g)	池塘组质量分数/(g/100g)
天冬氨酸 Asp	1.63±0.05 ^a	1.56±0.06 ^a
苏氨酸 Thr [△]	0.72±0.04 ^a	0.70±0.04 ^a
丝氨酸 Ser [□]	0.63±0.05 ^a	0.59±0.04 ^a
谷氨酸 Glu	2.35±0.42 ^a	2.22±0.30 ^a
甘氨酸 Gly [□]	0.79±0.02 ^a	0.71±0.04 ^b
丙氨酸 Ala	0.94±0.05 ^a	0.92±0.03 ^a
胱氨酸 Cys [□]	0.10±0.04 ^a	0.093±0.03 ^a
缬氨酸 Val [△]	0.78±0.06 ^a	0.77±0.05 ^a
蛋氨酸 Met [△]	0.37±0.04 ^a	0.30±0.06 ^a
异亮氨酸 Ile [△]	0.68±0.03 ^a	0.68±0.02 ^a
亮氨酸 Leu [△]	1.34±0.04 ^a	1.30±0.03 ^a
酪氨酸 Tyr [□]	0.51±0.05 ^a	0.47±0.05 ^a
苯丙氨酸 Phe [△]	0.73±0.03 ^a	0.72±0.02 ^a
赖氨酸 Lys [△]	1.17±0.08 ^b	1.44±0.1 ^a
组氨酸 His	0.47±0.02 ^a	0.42±0.03 ^a
精氨酸 Arg [□]	0.88±0.03 ^a	0.81±0.04 ^a
脯氨酸 Pro	0.48±0.04 ^a	0.42±0.03 ^a
必需氨基酸 ΣEAA	5.79±0.32 ^a	5.91±0.32 ^a
总氨基酸 ΣTAA	14.57±1.09 ^a	14.12±0.97 ^a
非必需氨基酸 ΣNEAA	8.78±0.77 ^a	8.21±0.65 ^a
ΣEAA/ΣNEAA	0.66	0.72
ΣEAA/ΣTAA	0.40	0.42

注: △表示必需氨基酸; □半必需氨基酸。同行字母不同表示差异性显著($P<0.05$)

模式, 组成氨基酸的必需氨基酸/总氨基酸($\Sigma\text{EAA}/\Sigma\text{TAA}$)为 40%左右, 必需氨基酸/非必需氨基酸($\Sigma\text{EAA}/\Sigma\text{NEAA}$)为 60%以上, 表明蛋白质质量较佳(赵亭亭等, 2018), 跑道组和池塘组鲫鱼 $\Sigma\text{EAA}/\Sigma\text{TAA}$ 分别为 40%、42%, 符合以上指标要求; $\Sigma\text{EAA}/\Sigma\text{NEAA}$ 分别为 66%、72%, 两者都远远高于 60%。综上所述, 两组鲫鱼肌肉均含有丰富的氨基酸, 且氨基酸具有良好的平衡性, 营养价值较高, 均是人体补充氨基酸的优质食物来源和选择。

2.6 脂肪酸组成及含量分析

两种养殖模式的鲫鱼脂肪酸组成, 如表 5 所示。脂肪酸对机体健康发挥着重要作用, 跑道组和池塘组鲫鱼分别检出了 17 和 15 种脂肪酸。相比总脂肪酸含量, 跑道组(6.145 8 g/100 g)显著高于池塘组(2.556 6 g/100 g), 表明跑道组鲫鱼可以为人体提供更多的脂肪酸。

脂肪酸可分为饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸, 其中跑道组的饱和脂肪酸值(1.342 0 g/100 g)、不饱和脂肪酸(4.803 8 g/100 g)均高于池塘组的 0.488 5 g/100 g 和 1.411 1 g/100 g。因此跑道组中含量较丰富的饱和脂肪酸包括 C18:0 硬脂酸, 特别是不饱和脂肪酸中的 C16:1 棕榈油酸、C18:2n6c 亚油酸以及 C18:1n9c 油酸。有报道表明, 硬脂酸可以使得饭后的血脂浓度降低(王珂欣等, 2023)。棕榈油酸能够降低糖异生作用(姜晓凡, 2021), 缓解胰岛素抵抗(高山等, 2020), 有利于血糖的调节, 对糖尿病的治疗具有积极影响。亚油酸有助于降低血液中的胆固醇浓度(Fritsche, 2015)。而油酸具有降低心血管疾病的发生率, 减少炎症等作用(Martins *et al.*, 2023)。此外, 二十碳五烯酸(EPA)和二十二碳六烯酸(DHA)因其保健作用而备受关注, 例如改善脑部功能、缓解神经退行性疾病、抗肿瘤活性以及调节脂质代谢等功能(Zhang *et al.*, 2019)。两组鲫鱼都具有较高的 EPA、DHA 含量。总体而言, 跑道组鲫鱼的脂肪酸组成更合理均衡, 营养价值相对较高, 可作为人体的优质脂肪来源。据报道, 构成食品特征风味的挥发性成分的生成, 与脂肪酸氧化和脂质分解作用有较大关系。如小分子化合物醛、醇和酮, 由长链不饱和脂肪酸的进一步氧化和分解而产生的, 从而导致鱼的风味和异味(Zhao *et al.*, 2022)。同时脂肪酸可以与美拉德反应化合物反应生成气味阈值较低的风味物质, 因而对风味产生更大的影响(Aaslyng *et al.*, 2017), 本实验中两组鲫鱼的风味成分分析还需进一步讨论。

表 5 脂肪酸组成及含量比较
Tab.5 Comparison of fatty acid composition and content

脂肪酸	跑道组/(g/100g)	池塘组/(g/100g)
C14:0 肉豆蔻酸	0.039 0±0.002 ^a	0.012 8±0.001 ^b
C15:0 十五烷酸	0.006 1±0.0001 ^a	ND ^b
C16:0 十六烷酸	1.021 0±0.002 ^a	0.386±0.004 ^b
C16:1 棕榈油酸	0.185 6±0.000 2 ^a	0.087 5±0.000 3 ^b
C18:0 硬脂酸	0.276 1±0.000 1 ^a	0.089 3±0.000 1 ^b
C18:1n9c 油酸	2.800 1±0.000 1 ^a	0.748 2±0.000 2 ^b
C18:2n6c 亚油酸	1.335 9±0.000 3 ^a	0.350 3±0.000 2 ^b
C18:3n6 γ -亚油酸	0.037 3±0.000 2 ^a	0.007 1±0.000 1 ^b
C18:3n3 α -亚油酸	0.110 7±0.000 3 ^a	0.027 7±0.000 6 ^b
C20:1 花生烯酸	0.131 4±0.000 4 ^a	0.050 7±0.000 3 ^b
C20:2 顺-11, 14-二十二碳二烯酸	0.032 2±0.000 2 ^a	0.013 2±0.000 2 ^a
C20:3n6 顺-8, 11, 14-二十二碳三烯酸	0.066 8±0.000 3 ^a	0.029 2±0.000 2 ^b
C20:3n3 顺-11, 14, 17-二十碳三烯酸	0.004 7±0.000 2 ^a	ND ^b
C20:4n6 花生四烯酸	0.059 2±0.000 8 ^a	0.045 3±0.005 ^b
C22:1n9 芥酸	0.004 7±0.000 2 ^b	0.006 4±0.000 1 ^a
C20:5n3 顺-5, 8, 11, 14, 17-二十碳五烯酸 EPA	0.004 2±0.000 1 ^a	0.003 6±0.000 1 ^b
C22:6n3 顺-4, 7, 10, 13, 16, 19-二十二碳六烯酸 DHA	0.031 0±0.000 3 ^b	0.041 9±0.000 2 ^a
不饱和脂肪酸 UFA	4.803 8	1.411 1
饱和脂肪酸 SFA	1.342 0	0.488 5
(EPA+DHA)	0.035 2	0.045 5
不饱和脂肪酸/饱和脂肪酸($\Sigma\text{UFA}/\Sigma\text{SFA}$)	3.58	2.88
总脂肪酸 FA	6.145 8	2.556 6

注: 表示饱和脂肪酸; 表示不饱和脂肪酸。同行字母不同表示差异性显著($P<0.05$)

2.7 不同养殖模式下鲫鱼的 GC-IMS 分析

气相色谱-离子迁移谱联用(GC-IMS)技术是一种新的气相分离检测技术, 具有分析迅速、灵敏度高、进样可变、无需前处理等优点(Wang *et al.*, 2020)。Duan 等(2021)利用 GC-IMS、电子鼻和电子舌技术, 结合游离氨基酸分析, 对不同地理来源和不同物种的鲑鱼进行了风味成分的分析, 结果证明 GC-IMS 为 4 种方法之中确定鲑鱼来源的最佳技术。本研究通过 GC-IMS 技术用于区分不同养殖模式下鲫鱼的特征风味差异。如图 3a 所示, 在横坐标 1.0 处展现了经过归一化处理的谱图反应离子峰。每个谱图点代表一种挥发性有机物, 蓝色色调表示低浓度, 红色则表示高浓度。通过参照谱图中的信号峰, 形成不同样品之间的差异谱图。将跑道组鲫鱼样品作为参照, 与之对比池

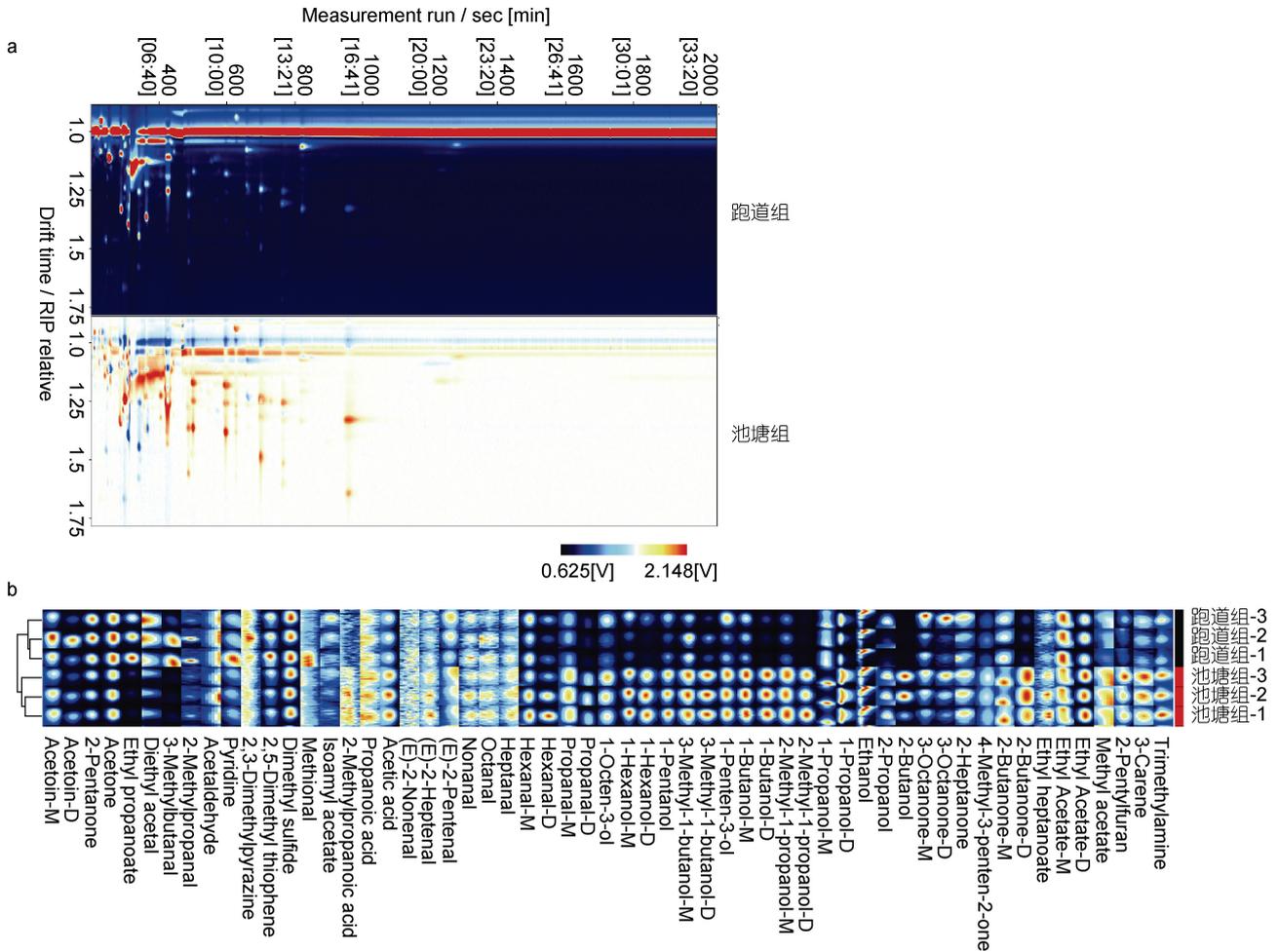


图3 不同养殖模式下鲫鱼的GC-IMS差异谱图(a)和指纹图谱(b)

Fig.3 GC-IMS difference spectrum (a) and fingerprint (b) of *C. auratus* from different aquaculture modes

塘组样品,挥发性物质含量的差异明显。红色色调加深表示对应物质浓度较跑道组更高,而蓝色色调加深则表示浓度更低。这结果表明,在池塘养殖模式下,鲫鱼样品与参照样品(跑道组)存在显著差异,从而验证了不同养殖模式的鲫鱼中存在着挥发性风味物质的差异。该差异可能归因于两种养殖模式下鱼类生长环境和饲养方式的不同,进一步影响了鱼体内的代谢产物和挥发性有机物的生成。

为深入比较不同养殖模式下鲫鱼挥发性化合物的差异,研究利用 Gallery Plot 插件绘制了 GC-IMS 指纹图谱,如图 3b。在这两种养殖模式下的鲫鱼中,共检测到 57 种挥发性化合物(包括 11 种单体和 11 种二聚体)。这些化合物可归类为 6 种酯类、16 种醇类、15 种醛类、10 种酮类、3 种酸类、1 种烃类以及 6 种含硫、含氮、含氧及杂环化合物,其中以酯类、高级醇和醛酮类化合物为主要成分,且大多数醛类化合物阈值较低,对整体风味有较大贡献,其中酮类和醇

类物质阈值较醛类高,主要表现出水果味、奶油味等令人愉悦的香气(徐永霞等, 2021),但会有部分酮类化合物可能与其他风味物质相互作用,使鱼腥味增强(吴俊杰等, 2023)。在跑道组鲫鱼中,高含量的化合物包括乙偶姻、2-戊酮、丙酮、丙酸乙酯、乙缩醛、3-甲基丁醛、2-甲基丙醛、乙醛、吡啶、2,3-二甲基吡嗪、2,5-二甲基噻吩、二甲基硫醚、甲硫基丙醛和乙酸异戊酯等。另一方面,池塘组鲫鱼中高含量的化合物有 2-甲基丙酸、丙酸、乙酸、E-2-壬烯醛、E-2-庚烯醛、E-2-戊烯醛、壬醛、辛醛、庚醛、己醛、丙醛、1-辛烯-3-醇、1-己醇、1-戊醇、3-甲基-1-丁醇、1-戊烯-3-醇、1-丁醇、2-甲基-1-丙醇、1-丙醇、乙醇、2-丙醇、2-丁醇、3-辛酮、2-庚酮、4-甲基-3-戊烯-2-酮、2-丁酮、庚酸乙酯、乙酸乙酯、乙酸甲酯、2-戊基咪喃、3-萜烯和三甲胺等。池塘组中酮类物质含量高,可能会有鱼腥味加重的风险,尤其是还含有 1-辛烯-3-醇,其为低阈值化合物,具有蘑菇味和鱼腥味

(孙慧娟等, 2023)。而三甲胺则在鱼死后的氧化还原反应中形成, 呈现典型的鱼腥味, 是腐败鱼的主要成分之一, 且受到消费者排斥(Heising *et al.*, 2014)。因此, 跑道组鲫鱼中的 1-辛烯-3-醇和三甲胺含量较低, 这表明跑道组鲫鱼可能具有更佳的风味质量, 这种差异可能归因于其特定的养殖环境和饲养模式。

2.8 不同养殖模式下鲫鱼的层次聚类分析

通过对不同养殖模式下鲫鱼的基础营养成分、游离氨基酸、脂肪酸含量和 GC-IMS 输出峰强度等数据进行归一化处理, 并对结果进行层次聚类分析, 结果仅呈现了 T-test 差异显著性前 60 的指标, 具体见图

4。结果显示, 跑道组(PD)和池塘组(CT)样本之间的聚类距离远大于平行样本内部的距离, 表明不同养殖模式下鲫鱼之间存在显著差异。在基础营养成分方面, 跑道组表现出相对较高的蛋白质和灰分含量, 同时呈现较低的粗脂肪含量。然而, 跑道组具有更高的脂肪酸含量, 其中包括丰富的不饱和脂肪酸, 如 C20:1 花生烯酸、C16:1 棕榈油酸、C18:3n6 γ -亚油酸、C18:2n6c 亚油酸、C18:1n9c 油酸和 C18:3n3 α -亚油酸等。相反, 池塘组的粗脂肪成分可能主要由类脂(例如固醇和磷脂)组成。有研究指出更高的不饱和脂肪酸以及相对较低的固醇含量, 有助于缓解炎症和心血

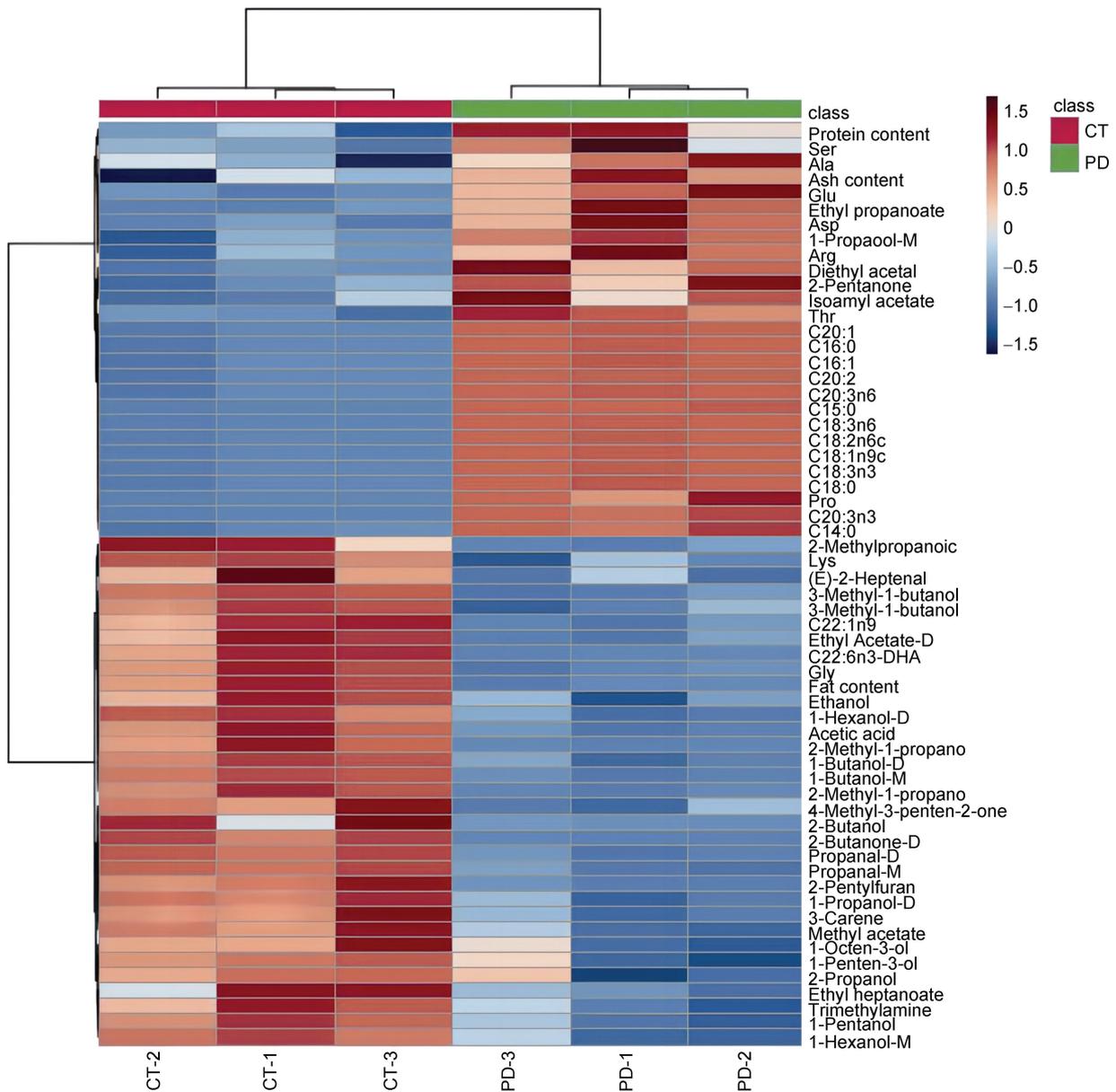


图 4 不同养殖模式下鲫鱼的层次聚类热图

Fig.4 Hierarchical clustering heatmaps of *C. auratus* from different aquaculture modes

管疾病(Liu *et al.*, 2023; Simonen *et al.*, 2023), 从而使跑道组鲫鱼更适合健康饮食模式。此外 GC-IMS 分析获得的挥发性风味成分占 33 种, 占总指标的 55%。这意味着在两种养殖模式下, 鲫鱼的挥发性成分存在显著差异。这些差异可能源自不同养殖模式下鱼类生长环境、饲料和代谢产物的变化, 进一步影响了其品质特征。因此, 相较于其他指标检测分析需要更多的时间成本, GC-IMS 分析可用于快速区分不同养殖模式下鲫鱼的挥发性风味物质差异, 从而在食品鉴别方面具有巨大潜力。总之, 不同的养殖模式对鲫鱼的营养价值和风味产生巨大影响。本研究对水产品养殖模式选择、产品定位以及食品质量控制提供了重要的科学支持。

3 结论

通过分析两种养殖模式鲫鱼的各项指标发现, 两组鲫鱼在不同养殖方式下的形体确有差异, 且跑道组鲫鱼呈现出高蛋白低脂肪的特点。两组鲫鱼的蒸煮损失和持水力均无显著差异, 但跑道组鲫鱼肌肉蛋白质更易于人体消化。此外, 跑道组鲫鱼的大部分游离氨基酸含量都高于池塘组, 且跑道组鲫鱼呈现鲜甜味的氨基酸含量更显著, 因此跑道组鲫鱼比池塘组鲫鱼可能具有更好地风味。两组鲫鱼肌肉氨基酸均符合 FAO/WHO 的理想蛋白质模式, 含有丰富氨基酸且组成合理均衡。同时跑道组鲫鱼的脂肪酸组成更合理均衡, 营养价值更高, 可作为人体的优质脂肪来源。根据 GC-IMS 分析和层次聚类分析的结果, 验证了不同养殖模式的鲫鱼中存在着挥发性风味物质的差异, 且跑道组鲫鱼中的 1-辛烯-3-醇和三甲胺含量较低, 这表明跑道组鲫鱼可能具有更佳的风味质量, 同时也说明 GC-IMS 技术可快速有效鉴定不同养殖模式下的鲫鱼。综上表明, 池塘内循环流水跑道养殖在一定程度上可改善鲫鱼营养品质和特征风味, GC-IMS 技术在鉴定不同养殖模式鱼类方面潜力巨大, 同时也为消费者日常选购、养殖者养殖模式选择以及产品定位等方面提供了理论依据。

参 考 文 献

王珂欣, 贾京华, 刘薇, 等, 2023. 超声辅助水酶法提取赤子爱胜蚓油脂及其脂肪酸组成分析[J/OL]. 中国油脂, 1-9. (2023-06-16). <https://doi.org/10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230147>.

史庆超, 熊小琴, 王均, 等, 2021. 高位池和传统池塘养殖大

口鲶肌肉营养品质的比较[J]. 现代畜牧兽医(2): 35-38.

朱士臣, 冯媛, 彭建, 等, 2021. 池塘内循环水“跑道”系统与传统池塘养殖的三角鲂营养品质对比研究[J]. 食品安全质量检测学报, 12(3): 1057-1065.

刘凯, 李奎, 石伟, 等, 2021. 池塘内循环流水养殖草鱼的研究[J]. 湖南农业科学(8): 70-73.

刘梅, 宓国强, 郭建林, 等, 2019. 池塘内循环流水养殖模式对黄颡鱼生长性能、形体指标、血清生化指标及肌肉营养成分的影响[J]. 动物营养学报, 31(4): 1704-1717.

刘梅, 原居林, 倪蒙, 等, 2021. 大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)不同养殖模式氮磷收支及养殖效果研究[J]. 海洋与湖沼, 52(3): 718-728.

孙立春, 陈丽娟, 倪玲, 等, 2012. 纸型海藻食品的氨基酸构成和模拟胃肠消化特性的研究[J]. 食品科学, 33(19): 141-145.

孙慧娟, 李璐, 马凯华, 等, 2023. 革胡子鲶鱼皮营养成分和挥发性物质分析[J]. 中国食品学报, 23(2): 341-352.

李双琦, 崔震昆, 2022. 热处理方式对鲈鱼游离氨基酸及品质影响[J]. 中国调味品, 47(1): 32-35, 45.

李倩, 郭建林, 王雨辰, 等, 2020. 池塘内循环流水养殖下太湖鲂鮰(翘嘴鲂♀)×三角鲂(♂)肠道微生物群落变化的研究[J]. 海洋与湖沼, 51(2): 364-370.

李敏, 蔡景波, 张翔, 等, 2022. 2种养殖模式梭鱼肌肉营养成分及挥发性风味成分比较[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 41(2): 119-126, 148.

吴俊杰, 魏帮鸿, 郭全友, 等, 2023. 即食烤制鱿鱼工艺优化及风味分析[J/OL]. 食品与发酵工业, 1-11. (2023-06-16). <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.035306>.

赵亭亭, 张岩, 陈超, 等, 2018. 3种养殖石斑鱼的肌肉营养成分分析与品质评价[J]. 渔业科学进展, 39(6): 89-96.

姜晓凡, 2021. 棕榈油酸通过 SIRT3 调控高脂诱导的肝脏糖异生的作用及其机制[D]. 济南: 山东大学.

贾丽, 潘勇, 刘帅, 2011. 池塘内循环流水养殖模式——美国的一种新型养殖模式[J]. 中国水产(1): 40-42.

徐永霞, 白旭婷, 冯媛, 等, 2021. 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, 42(22): 270-275.

高山, 王嘉佳, 胡高爽, 2020. 沙棘果油棕榈油酸提取物的富集及改善胰岛素抵抗活性[J]. 食品科学, 41(10): 272-280.

黄爱霞, 陈建明, 姜建湖, 等, 2021. 池塘内循环跑道养殖青鱼形体指数和肌肉营养价值分析[J]. 科学养鱼(5): 73-74.

董立学, 喻亚丽, 毛涛, 等, 2021. 池塘内循环流水养殖斑点叉尾鲷肌肉品质的分析[J]. 中国水产科学, 28(7): 914-924.

蔡振鑫, 刘春红, 2021. 基于神经网络的多特征结合法鲫鱼质量估计[J]. 中国农业科技导报, 23(12): 109-115.

AASLYNG M D, MEINERT L, 2017. Meat flavour in pork and beef – From animal to meal [J]. Meat Science, 132: 112-117.

CAI W J, LIU H K, HE L Y, *et al.*, 2023. Exercise training combined with a high-fat diet improves the flesh flavour, texture and nutrition of gibel carp (*Carassius auratus gibelio*) [J]. Food Chemistry: X, 17: 100612.

DING M Z, HUANG Z X, JIN Z Y, *et al.*, 2022. The effect of fat content in food matrix on the structure, rheological properties and digestive properties of protein [J]. Food

- Hydrocolloids, 126: 107464.
- DUAN Z L, DONG S L, DONG Y W, *et al*, 2021. Geographical origin identification of two salmonid species via flavor compound analysis using headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry combined with electronic nose and tongue [J]. *Food Research International*, 145: 110385.
- FRITSCHKE K L, 2015. The science of fatty acids and inflammation [J]. *Advances in Nutrition*, 6(3): 293S-301S.
- HEISING J K, VAN BOEKEL M A J S, DEKKER M, 2014. Mathematical models for the trimethylamine (TMA) formation on packed cod fish fillets at different temperatures [J]. *Food Research International*, 56: 272-278.
- LIU Y, SHEN N, XIN H W, *et al*, 2023. Unsaturated fatty acids in natural edible resources, a systematic review of classification, resources, biosynthesis, biological activities and application [J]. *Food Bioscience*, 53: 102790.
- MARTINS N, MAGALHÃES R, VIERIA L, *et al*, 2023. Dietary oleic acid supplementation improves feed efficiency and modulates fatty acid profile and cell signaling pathway in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles fed high-lipid diets [J]. *Aquaculture*, 576: 739870.
- SIMONEN P, ÖÖRNI K, SINISALO J, *et al*, 2023. High cholesterol absorption: A risk factor of atherosclerotic cardiovascular diseases? [J]. *Atherosclerosis*, 376: 53-62.
- VASKOSKA R, HA M, ONG L, *et al*, 2021. Myosin sensitivity to thermal denaturation explains differences in water loss and shrinkage during cooking in muscles of distinct fibre types [J]. *Meat Science*, 179: 108521.
- WANG S Q, CHEN H T, SUN B G, 2020. Recent progress in food flavor analysis using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) [J]. *Food Chemistry*, 315: 126158.
- ZHANG L H, XU N, LIU X L, *et al*, 2021. Exercise training accelerates UPS- and mTOR-mediated protein turnover of grass carp *Ctenopharyngodon idella* [J]. *Aquaculture*, 545: 737252.
- ZHANG T T, XU J, WANG Y M, *et al*, 2019. Health benefits of dietary marine DHA/EPA-enriched glycerophospholipids [J]. *Progress in Lipid Research*, 75: 100997.
- ZHAO D D, HU J, CHEN W X, 2022. Analysis of the relationship between microorganisms and flavour development in dry-cured grass carp by high-throughput sequencing, volatile flavour analysis and metabolomics [J]. *Food Chemistry*, 368: 130889.

STUDY ON THE EFFECTS OF DIFFERENT CULTURE MODES ON THE NUTRITIONAL QUALITY AND CHARACTERISTIC FLAVOR OF *CARASSIUS AURATUS*

WEI Yu¹, WENG Xu-Dong², YU Jin^{1,3}, GAO Yang¹, YING Xiao-Guo¹,
YU Lin¹, HU Jia-Jie¹, ZENG Ni³

(1. School of Food and Pharmacy, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. Zhejiang Yulaoda Agricultural Technology Co., Ltd., Quzhou 324400, China; 3. Longyou Aquaculture Development Center, Agricultural and Rural Bureau of Longyou County, Quzhou 324400, China)

Abstract In order to study the nutritional quality and characteristic flavor of *Carassius auratus* under the conditions of internal-circulation pond aquaculture mode and traditional pond aquaculture mode, the indexes of *C. auratus* morphology, basic nutrients, cooking loss and water holding capacity, muscle protein digestibility, amino acids, fatty acids and volatile compounds were analyzed and evaluated. The results showed that the morphometric indexes and basic nutrients of *C. auratus* in the raceway group and the pond group were quite different, and the raceway group had the characteristics of high protein and low fat. Cooking loss and water holding capacity were close to those of *C. auratus* in both groups of culture modes. Protein digestibility of *C. auratus* in the raceway group was significantly higher than those in the pond group ($P<0.05$). The results of free amino acids showed that the contents of umami amino acids (Asp, Glu) and sweet amino acids (Glu, Ala) in the fish of the raceway group were significantly higher than those of the pond group ($P<0.05$), so the raceway group may have better flavor. In addition, there was no significant difference in the amino acid composition of *C. auratus* muscle between the two culture modes ($P<0.05$). However, the unsaturated fatty acid content of *C. auratus* in the raceway group (4.803 8 g / 100 g) was higher than that in the pond group (1.411 1 g / 100 g). Based on the results of GC-IMS, it can be seen that the volatile compounds of *C. auratus* under the two culture modes are significantly different. Through hierarchical clustering analysis, 33 characteristic differential markers were screened from 57 volatile compounds to distinguish *C. auratus* under different culture modes. The results showed that the nutrient quality and characteristic flavor of *C. auratus* could be improved to a certain extent by internal-circulation pond aquaculture mode, which could be effectively and quickly identified by GC-IMS technology. At the same time, it could clarify the material basis of flavor sensory differences, and provide a theoretical basis for the selection of freshwater fish culture mode and product positioning.

Key words internal-circulation pond aquaculture mode; traditional pond aquaculture mode; raceway aquaculture mode; *Carassius auratus*; nutritional quality; flavor