

## 两种养殖模式金背鲤肠道微生物菌群和主体风味差异分析

于美娟<sup>1,2</sup>, 杨 慧<sup>1</sup>, 余长生<sup>2,3</sup>, 蔡教明<sup>3</sup>, 补子龙<sup>3</sup>, 曾宪文<sup>3</sup>

1. 湖南省农业科学院农产品加工研究所, 湖南长沙 410125

2. 湖南省水产产业技术体系, 湖南长沙 410125

3. 湖南省怀化市畜牧水产事务中心, 湖南怀化 418000

**摘要:** 探讨不同养殖模式下金背鲤 (*Cyprinus carpio* var. *Jinbei*) 肠道菌群和鱼肉风味品质差异, 对金背鲤的繁殖优化具有重要意义。采用高通量测序技术对稻田放养和池塘养殖模式下金背鲤的肠道微生物进行测序, 利用液相色谱和顶空固相微萃取-气相色谱-离子迁移谱联用 (HS-SPME-GC-IMS) 技术测定其滋味物质、挥发性风味化合物, 结合感觉阈值计算滋味活性值和相对气味活度值。结果显示: 两种养殖模式的金背鲤肠道细菌群落结构差异显著, 稻田放养 (FGF) 组以弧菌 (*Vibrio*)、拟杆菌 (*Bacteroides*)、交替单胞菌 (*Alteromonadales*)、希瓦氏菌 (*Shewanella*)、嗜冷假单胞菌 (*Pseudomonas psychrophila*) 和 *Brevinema* 属为主, 池塘养殖 (FGP) 组以莫拉克斯氏菌 (*Moraxella*) 和克雷伯菌属 (*Klebsiella*) 为主; FGF组中鲜味肌苷酸含量及其滋味活性值 ( $1.676 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $6.705$ ) 远高于FGP组 ( $0.246 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $0.985$ ), FGF组鲜味氨基酸和甜味氨基酸含量 ( $0.143$ 和 $2.052 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 高于FGP组 ( $0.109$ 和 $2.001 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 而其苦味氨基酸 ( $3.193 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 却低于FGP组 ( $3.836 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); 金背鲤的挥发性化合物组分复杂, 其关键气味化合物 ( $\text{ROAV} \geq 1$ ) 和对整体风味有修饰作用的化合物 ( $0.1 \leq \text{ROAV} < 1$ ) 的种类存在差异。菌属与风味物质的相关性分析显示弧菌属、拟杆菌属、克雷伯菌属和摩根菌属 (*Morganella*) 与风味物质呈显著相关 ( $0.01 \leq P < 0.05$  &  $0.001 \leq P < 0.01$  &  $P < 0.001$ )。研究表明, 养殖模式影响了金背鲤的肠道微生物, 并间接影响了其风味品质。

**关键词:** 金背鲤; 稻田放养; 池塘养殖; 肠道菌群; 主体风味物质

中图分类号: TS 254.2

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



## Analysis on differences of microbial community structure and main flavor substances of *Cyprinus carpio* var. *Jinbei* cultured in paddy fields and ponds

YU Meijuan<sup>1,2</sup>, YANG Hui<sup>1</sup>, YU Changsheng<sup>2,3</sup>, CAI Jiaoming<sup>3</sup>, BU Zilong<sup>3</sup>, ZENG Xianwen<sup>3</sup>

1. Agricultural Products Processing Institute, Hunan Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410125, China

2. Technology System of Aquatic Industry in Hunan Province, Changsha 410128, China

3. Huaihua Animal Husbandry and Fishery Affairs Center, Huaihua 418000, China

**Abstract:** It is important to study the differences of intestinal flora and fish flavor quality of *Cyprinus carpio* var. *Jinbei* under different culture modes for its breeding optimization. We applied illumina high-throughput sequencing technology to analyze intestinal microflora of *C. carpio* var. *Jinbei* cultured in paddy fields (FGF) and ponds (FGP), respectively. Besides, we used liquid chromatography (LC) to determine the flavor substances, and used headspace solid phase microextraction combining with gas chromatography-ion mobility spectrometry (HS-SPME-GC-IMS) to determine the volatile flavor substances. Then we calculated the taste activity value and relative odor activity by combining the sensory threshold. Significant difference analysis shows that *Vibrio*, *Bacteroides*, *Alteromonadales*, *Shewanella*, *Pseudomonas psychrophila* and *Brevinema* were the main bacteria

收稿日期: 2022-10-12; 修回日期: 2022-12-30

基金项目: 湖南省现代农业水产产业技术体系岗位专家专项资金 (湘农发 [2019] 105 号); 湖南省自然科学基金 (2020JJ4392)

作者简介: 于美娟 (1976—), 女, 研究员, 硕士, 研究方向为水产品加工与综合利用。E-mail: 82923686@qq.com

in FGF group, while *Moraxella* and *Klebsiella* were the main bacteria in FGP group. The contents of IMP and flavor activity in FGF group (1.676 g·kg<sup>-1</sup> and 6.705) were significantly higher than those in FGP group (0.246 g·kg<sup>-1</sup> and 0.985). The contents of umami amino acids and sweet amino acids in FGF group (0.143 and 2.052 g·kg<sup>-1</sup>) were higher than those in FGP group (0.109 and 2.001 g·kg<sup>-1</sup>). However, the contents of bitter amino acids in FGF group (3.193 g·kg<sup>-1</sup>) were lower than those in FGP group (3.836 g·kg<sup>-1</sup>). Moreover, the components of volatile compounds were complex, and the types of key odor compounds (ROAV $\geq$ 1) and compounds that could modify the overall flavor (0.1 $\leq$ ROAV $<$ 1) were different. The correlation analysis between bacteria genera and flavor substances shows that *Vibrio*, *Bacteroides*, *Klebsiella* and *Morganella* were significantly correlated with flavor substances (0.01 $\leq$ P $<$ 0.05 & 0.001 $\leq$ P $<$ 0.01 & P $<$ 0.001). The results indicate that cultivation mode affects the intestinal microbes of fish, and affects the flavor quality of fish indirectly.

**Keywords:** *Cyprinus carpio* var. *Jinbei*; Paddy field culture; Pond culture; Intestinal bacterial flora; Main flavor substances

稻渔综合种养模式是在我国传统稻田养鱼的基础上, 利用互利共生原则建立起来的多物种共栖、多层次利用的一种新型农业模式<sup>[1-2]</sup>。这种养殖模式可以减少农药化肥的使用, 提高水稻和鱼类品质, 实现“一田两用”。金背鲤 (*Cyprinus carpio* var. *Jinbei*, 暂定名) 因具有独特的“金背金额”外观特征而得名, 是湘西地区在长期稻田养鱼过程中形成的鲤鱼地域性品种, 其生长速度快于本地鲤, 而且肉质厚实、口感鲜美, 深受消费者的喜爱。

稻田养殖实现了多物种共栖, 既可为养殖鱼类提供天然饵料, 且其低养殖密度也可改善水质, 促进鱼类生长, 并提升鱼类的品质<sup>[3-4]</sup>。有研究报道, 鱼类肠道微生物是动态变化的, 其群落结构受养殖模式和水体环境等因素的影响<sup>[5]</sup>。良好的养殖模式会提升水产动物的营养与风味品质<sup>[6]</sup>。如张艳霞等<sup>[7]</sup>研究发现普通网箱养殖的大黄鱼 (*Larimichthys crocea*) 鱼腥味、哈喇味及青草味较重, 而大围网箱养殖的则蘑菇味、脂香味、果香味较强。水产品的风味由气味和滋味两部分组成, 它们可以通过复杂的气味协同、累加、掩盖、融合作用以及滋味的变调、对比、消杀、相乘作用相互影响, 形成独特的风味<sup>[8]</sup>。目前有关金背鲤的研究报道非常有限, 探讨不同养殖模式下金背鲤肠道菌群和鱼肉风味品质的差异, 对下一步金背鲤的繁殖优化具有重要意义。

本文采用高通量测序技术, 对稻田和池塘养殖模式下金背鲤肠道微生物进行测序, 同时利用液相色谱 (LC) 测定滋味物质、顶空固相微萃取-气相色谱-离子迁移谱联用技术 (HS-SPME-GC-IMS) 测定挥发性风味物质, 结合感觉阈值与呈味、气味特征, 计算滋味活性值和相对气味活度值, 分析不同养殖模式下金背鲤的肠道菌群结构和菌群的差异及

主要风味物质特征差异性, 以为金背鲤下一步的选育繁殖提供研究方向, 并为完善和推广稻田养殖模式提供参考数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试剂

核苷酸标准物质 (纯度 $\geq$ 99%, 美国药典 USP 标准品); 24 种氨基酸标准品 (17 种氨基酸为混合标准品 2.5  $\mu$ mol·mL<sup>-1</sup>, 其他为分析纯, Sigma); DNA 凝胶回收试剂盒 (Qiagen 公司); TruSeq 文库构建试剂盒、MiSeq 测序试剂盒 (美国 Illumina 公司); 溶菌酶 (美国 BBI 公司)。

### 1.2 主要仪器设备

SynergyHTX 多功能酶标仪 (美国 BioTe Tek 公司); Illumina HiSeq 测序仪 (美国 Illumina 公司); 1200 高效液相色谱仪 (美国安捷伦公司); 1100 液相色谱仪 (美国安捷伦公司); FlavourSpec<sup>®</sup> 风味分析仪 (山东海能科学仪器有限公司)。

### 1.3 方法

#### 1.3.1 样品采集与处理

样品采集辰溪县凤凰山农业公司池塘养殖 (FGP) 组和稻田基地养殖 (FGF) 组, 同一批次放养、体型大小相似的金背鲤, 用冲氧袋运送至实验室, 在 FGP 和 FGF 组随机各选 5 尾, 在无茵状态下取出整个肠道, 采集肠道内容物置于无茵的离心管中, 液氮速冻, -80  $^{\circ}$ C 保存, 用于提取总 DNA。另外鱼放入塑料桶中静养 12 h 后, 各取 5 尾, 剖杀后去鳞、内脏、皮等, 手工取全鱼肌肉, 搅碎机绞碎成均匀肉糜后分装, -40  $^{\circ}$ C 冻藏备用。

#### 1.3.2 肠道微生物高通量测序分析

取肠道样本 (-80  $^{\circ}$ C 冰箱冻存) 放置在冰块上解冻, 放入研钵后加入液氮研磨至粉末, 使用预先

冷冻处理的 2 mL 离心管, 称量约 100 mg 样本进行总 DNA 提取。然后用乙醇沉淀纯化和 1% (质量分数) 琼脂糖凝胶电泳检测所提取的 DNA 浓度和纯度, 送百迈客生物公司使用 Illumina Hiseq2500 高通量测序平台进行测序分析。采用软件 USEARCH version 10.0<sup>[9]</sup> 进行 OTU 分析, Mothur version v.1.30<sup>[10]</sup> 进行 Alpha 指数分析。通过 RDP Classifier<sup>[11]</sup> (置信度阈值为 0.8) 进行物种注释, 并分别在各个分类水平统计各样本的群落组成。使用 LefSe 进行组间差异显著性分析。

### 1.3.3 核苷酸分析

采用高效液相色谱仪分析核苷酸。样品采用 10% (质量分数) 高氯酸溶液提取, 提取液调节 pH 为 6.8, 过 0.22 μm 滤膜上机测定, 记录峰面积, 响应值均应在仪器检测的线性范围之内, 根据标准品的保留时间定性, 外标法定量。

### 1.3.4 游离氨基酸分析

采用 Agilent 1100 液相色谱仪进行分析。称取 0.50 g 样品于 10 mL 离心管中, 加 0.01 mol·L<sup>-1</sup> 盐酸 5 mL, 混匀, 沸水浴 30 min, 离心取上清液, 沉淀再加 2 mL 0.01 mol·L<sup>-1</sup> 盐酸悬浮超声 5 min 后离心, 合并上清液, 定容至 10 mL, 过膜上机, 通过安捷伦公司自动在线衍生化方法, 比较游离氨基酸标准品的保留时间和峰面积来计算样品中游离氨基酸含量。

### 1.3.5 滋味活性值 (Taste activity value, TAV) 的计算

TAV 表示各呈味物质的浓度与该物质的阈值之比。参考徐永霞等<sup>[12]</sup> 的方法, 计算不同养殖模式下金背鲤肌肉中各游离氨基酸和核苷酸的 TAV。

### 1.3.6 挥发性化合物分析

称取 2.0 g 金背鲤肌肉样品置于一个 20 mL 顶空进样瓶中, 在 60 °C 下孵育 15 min, 随即用配置 CTC 多功能自动进样器和注射器的 GC-IMS (Flavour Spec®-G.A.S., 德国) 在不分流模式下进行后续分析。

测试条件: 采用 FS-SE-54-C4-CB-1 (15 m×0.53 mm) 色谱柱, 柱温 60 °C, N<sub>2</sub> 为载气, 流速 150 mL·min<sup>-1</sup>, IMS 温度 45 °C; 2 mL·min<sup>-1</sup> 维持至 20 min, 100 mL·min<sup>-1</sup> 维持至 30 min, 总运行 30 min。采用 LAV 软件 2.2.1 (G.A.S., 德国) 采集和处理 GC-IMS 数据, NIST 和 IMS 数据库来对挥发物进行定性。

每个样品中加入 10 μL 4-甲基-2-戊醇 (20×10<sup>-6</sup>)

内标物计算各挥发性成分的相对含量。

### 1.3.7 相对气味活度值 (Relative odor activity value, ROAV) 法评价

采用 ROAV 法<sup>[13]</sup> 的计算公式如下:

$$ROAV_i \approx \frac{C_{ri}}{C_{rstan}} \times \frac{T_{stan}}{T_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $C_{ri}$  为各挥发性组分的相对百分含量 (% , 质量比);  $C_{rstan}$  为对样品总体风味贡献最大组分的相对含量 (% , 质量比);  $T_{stan}$  为对样品总体风味贡献最大组分相对应的感觉阈值 (μg·kg<sup>-1</sup>);  $T_i$  为各挥发性组分相对应的感觉阈值 (μg·kg<sup>-1</sup>)。

### 1.4 数据处理

通过 Excel 2010 和 SPSS 22.0 软件对数据进行统计分析, 分析结果以“平均值±标准误 ( $\bar{x} \pm SE$ )”表示。采用 SPSS Statistics 23.0 软件的方差分析 (ANOVA,  $P < 0.05$ ); 使用 Origin 2018 软件作微生物菌群箱线图和风味柱形图; 微生物菌群与风味物质的相关性采用斯皮尔曼 (Spearman) 相关性系数计算。

## 2 结果

### 2.1 不同养殖模式下金背鲤肠道菌群组成分析

#### 2.1.1 OTU 聚类及多样性分析

采用韦恩图对不同养殖模式相关特征进行分析, 结果见图 1。两组样本共获得 787 个 OTUs, 稻田放养 FGF 组和池塘养殖 FGP 组共享的特征 OTU 有 469 个, 占总数的 59.6%。在特有的 OTU 中, FGF 组 196 个 (占比 24.9%), 高于 FGP 组 (122 个, 占比 15.5%), 主要分布于变形杆菌门、厚壁菌门和拟杆菌门。其 Alpha 多样性及差异如图 2 所示, FGF 组的 ACE 指数、Chao1 指数、香农-威纳指数 (Shannon-Wiener) 和辛普森指数 (Simpson) 均高于 FGP 组, 但差异不显著 ( $P > 0.05$ )。说明稻田

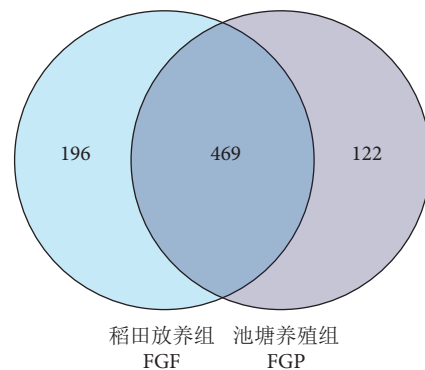


图1 两种养殖模式的金背鲤肠道菌的特征韦恩图

Fig. 1 Venn diagram of features of intestinal bacteria in *C. carpio* var. *Jinbei* of FGF and FGP groups

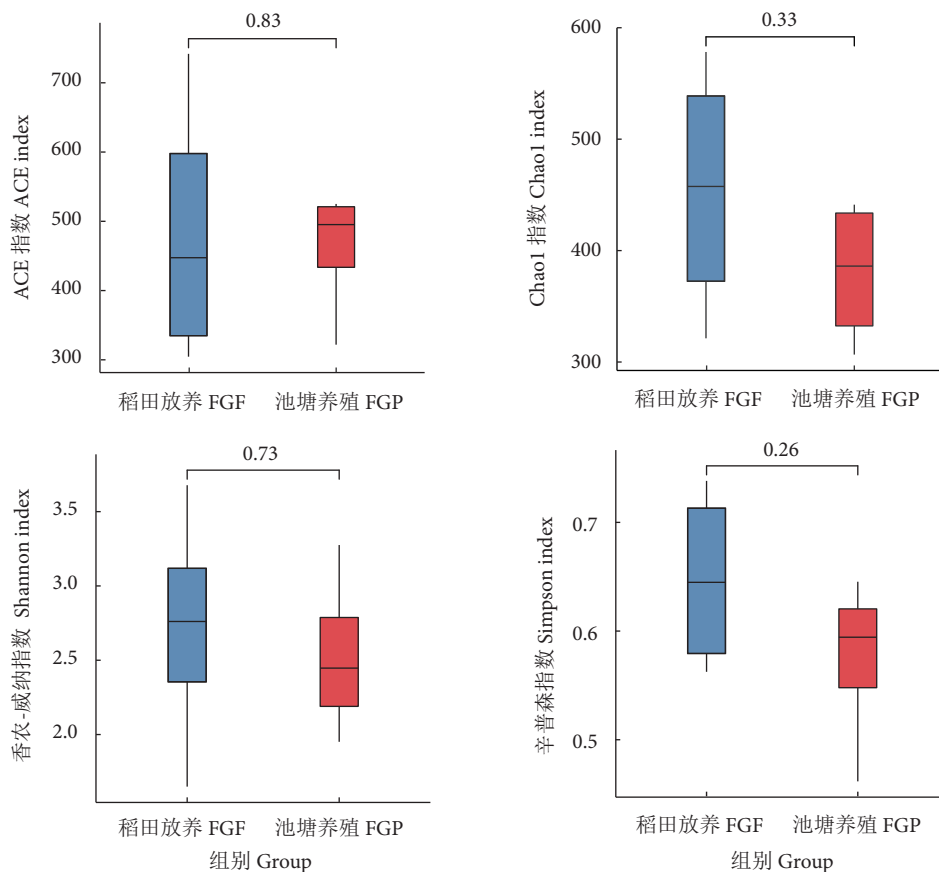


图2 两种养殖模式的金背鲤肠道微生物Alpha多样性指数

Fig. 2 Alpha diversity of intestinal microorganisms in *C. carpio* var. *Jinbei* of FGF and FGP groups

放养组在物种丰富度和均匀度上优于池塘养殖组，但无显著性差异。

2.1.2 菌群结构组成差异性分析

对样本中相对丰度大于 1% 的 OTU 进行相对丰度和差异分析。如图 3 所示，在生物学分类门水平上，两组养殖模式检出 4 个门水平，分别为变形

菌门、梭杆菌门、厚壁菌门和拟杆菌门，相对丰度大于 96%，这与黄颡鱼 (*Pseudobagrus vachell*)<sup>[14]</sup>、草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*)<sup>[15]</sup> 和罗非鱼 (*Oreochromis mossambicus*)<sup>[16]</sup> 肠道菌的结果一致。虽然养殖模式未改变优势菌门的种类，但影响了其相对丰度<sup>[14]</sup>。根据图 3 的单因素方差分析可知，除厚壁

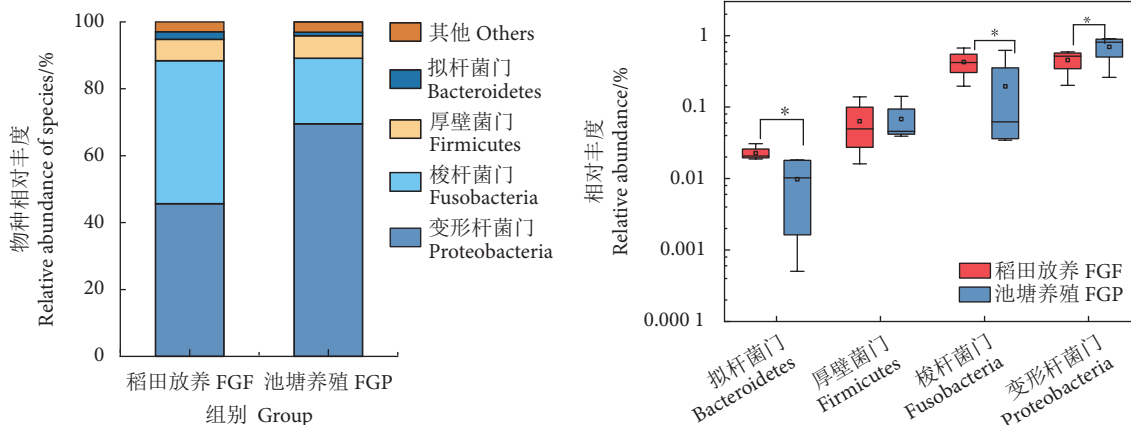


图3 门水平上的物种相对丰度及差异分析

注：\*. 差异显著 ( $P < 0.05$ )。图 4 同此。

Fig. 3 Relative abundance and differences of species at phylum level

Note: \*. Significant differences ( $P < 0.05$ ). The same case in Fig. 4.



菌门无显著性差异 ( $P>0.05$ ) 外, 其变形菌门 (45.7% vs. 69.6%)、梭杆菌门 (42.8% vs. 19.5%) 和拟杆菌门 (2.27% vs. 0.98%) 的相对丰度均存在显著性差异 ( $P<0.05$ )。

属水平上的生物学分类如图 4 所示。优势菌属结构不变, 其丰度值有差异, 相对丰度大于 1% 的

属有 6 个: 嗜水气单胞菌 (*Aeromonas*)、鲸杆菌属 (*Cetobacterium*)、肠杆菌 (*Enterobacteriaceae*)、弧菌属 (*Vibrio*)、乳球菌属 (*Lactococcus*) 和克雷伯菌属 (*Klebsiella*); 根据图 4 的单因素方差分析, 除乳球菌属外, 其他 5 个属之间存在显著性差异 ( $P<0.05$ )。

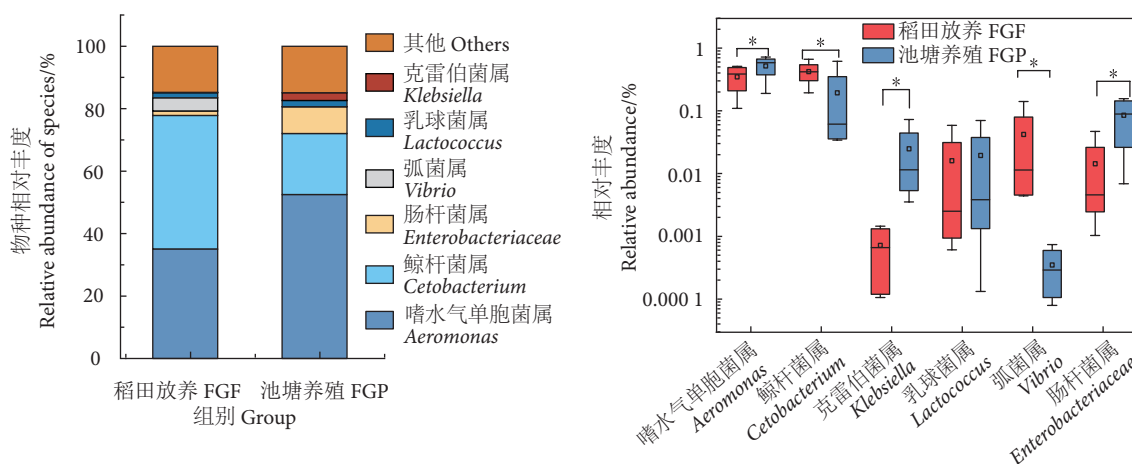


图4 属水平上的物种相对丰度及差异分析

Fig. 4 Relative abundance and differences of species at genus level

为进一步了解不同养殖模式下金背鲤肠道细菌群落结构的差异性, 采用组间 LEfSe 分析, 在不同组间寻找具有统计学差异的 Biomarker, 更清晰地筛选出了两组中有显著性差异的微生物 (LDA 阈值为 3)。由图 5 可知, 在 FGF 组主要为弧菌、拟杆菌 (*Bacteroides*)、交替单胞菌 (*Alteromonadales*)、希瓦氏菌 (*Shewanella*)、嗜冷假单胞菌 (*Pseudomonas psychrophila*) 和 *Brevinema*; FGP 组主要为莫拉克斯氏菌 (*Moraxella*) 和克雷伯菌属。

## 2.2 不同养殖模式下金背鲤鱼肌肉中滋味组成分析

### 2.2.1 核苷酸及其关联产物分析

采用高效液相色谱分析两种养殖模式金背鲤肌肉中的核苷酸及其关联化合物, 结果见表 1。可以看出, 两种养殖模式中 ATP 及其关联物的含量差异显著 ( $P<0.05$ ), FGF 组中鲜味肌苷酸 IMP 含量 ( $1.676 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 远远高于 FGP 组 ( $0.246 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ); 而呈苦味的次黄嘌呤核苷 HXR、次黄嘌呤 HX 却低于 FGP 组。其呈味物质含量高但贡献率不一定大, 贡献率通常用 TAV 表示, 其值等于样品中非挥发性滋味活性物质的浓度除以该化合物的阈值。当  $\text{TAV}>1$  时, 表示该化合物对整体滋味存在贡献; 当  $\text{TAV}<1$  时, 表示该滋味物质对于整体滋味贡献不大<sup>[16]</sup>。FGF 组中肌苷酸的 TAV 高达 6.705, FGP 组仅有 0.985; FGF 组和 FGP 组的腺苷酸 TVA 值

分别为 0.349 和 0.291; 此外, 稻田放养 FGF 组的 K 值 (8.805%) 小于池塘养殖 FGP 组 (21.305%)。由此推测, 稻田放养组的金背鲤肉质鲜味和鲜度优于池塘养殖组。

### 2.2.2 游离氨基酸组成分析

从表 2 可以看出, 两种模式共检出 23 种游离氨基酸, 包括 8 种必需氨基酸、2 种半必需氨基酸和 13 种非必需氨基酸。除羟脯氨酸、肌氨酸、天冬酰胺含量无显著性差异外 ( $P<0.05$ ), 其余氨基酸均有显著性差异 ( $P>0.05$ )。在游离氨基酸、必需氨基酸、半必需氨基酸和非必需氨基酸总量上, 两组养殖模式有显著性差异 ( $P<0.05$ )。在两组养殖模式中, 苦味氨基酸总量占比较高, 分别占游离氨基酸总量的 50.19% 和 53.74%, 两组间具有显著性差异 ( $P<0.05$ ); 其次是甜味氨基酸, 两组间差异不显著 ( $P>0.05$ ), 占比分别为 32.26% 和 28.46%; 鲜味和芳香族氨基酸比例较低, 但差异显著 ( $P<0.05$ ), 尤其 FGF 组鲜味氨基酸高于 FGP 组, 分别为 2.24% 和 1.53%。

呈味氨基酸含量高时, 是否其贡献率也高, 通常还要看滋味活度值的大小, 因呈味氨基酸的滋味活度值及其含量高低直接影响鱼肉的滋味<sup>[18-21]</sup>, FGF 组, 谷氨酸 TVA 大于 1, 高于 FGP 组, 对鲜味贡献大。组氨酸是苦味氨基酸, 两组 TAV 均大

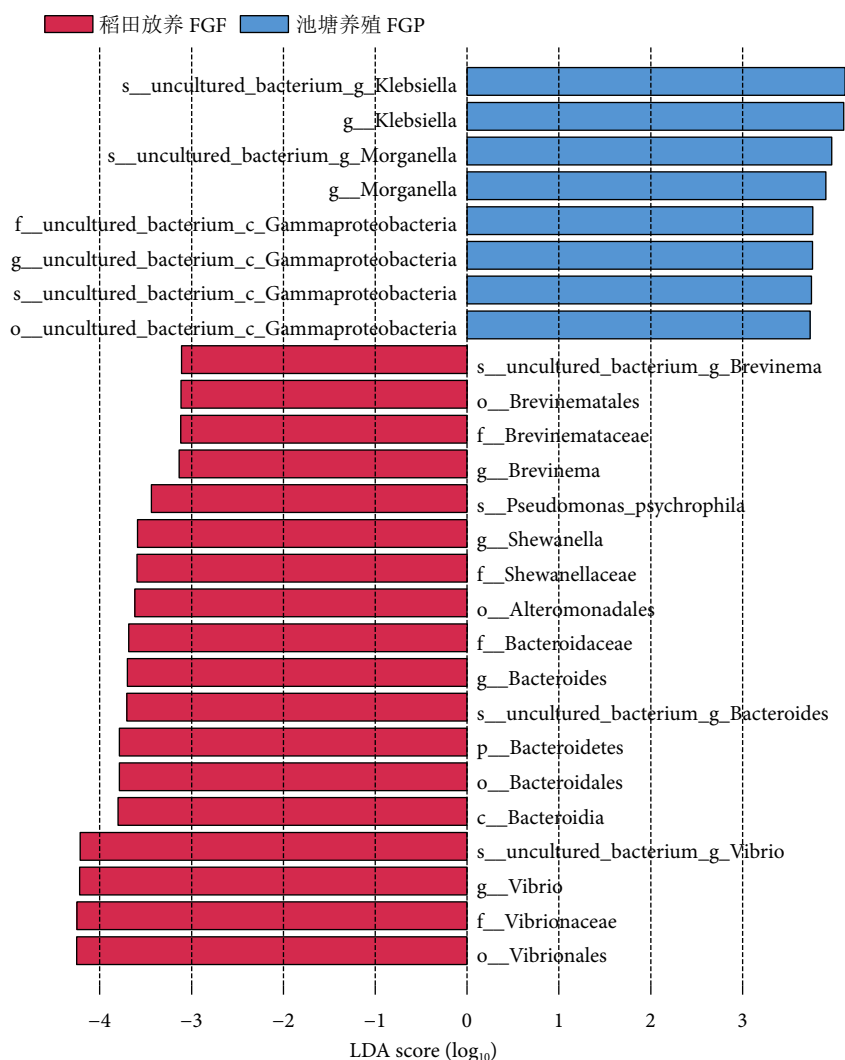


图5 两种养殖模式的金背鲤肠道微生物菌群的差异性分析

Fig. 5 Difference analysis of microbial flora in intestine of *C. carpio* var. *Jinbei* of FGF and FGP groups

表1 两种养殖模式的金背鲤肌肉中核苷酸及其关联产物含量及K值 (N=3)

Table 1 Nucleotides contents, their related products and K value in muscle of *C. carpio* var. *Jinbei* of FGF and FGP groups (N=3)

核苷酸种类 Nucleotide	阈值 <sup>[17]</sup> Threshold/ (g·kg <sup>-1</sup> )	呈味特征 Taste characteristics	核苷酸含量 Nucleotide content/(g·kg <sup>-1</sup> )		滋味活性值 TAV	
			稻田放养 FGF	池塘养殖 FGP	稻田放养 FGF	池塘养殖 FGP
腺苷三磷酸 ATP	—	—	0.051±0.006 <sup>a</sup>	0.07686±0.0012 <sup>b</sup>		
腺苷二磷酸 ADP	—	—	0.885±0.0271 <sup>b</sup>	1.935±0.0163 <sup>a</sup>		
腺苷酸 AMP	0.50	鲜甜味	0.1747±0.0173 <sup>a</sup>	0.146±0.00026 <sup>b</sup>	0.349	0.291
肌苷酸 IMP	0.25	鲜味	1.676±0.1109 <sup>a</sup>	0.246±0.0055 <sup>b</sup>	6.705	0.985
次黄嘌呤核苷 HXR	—	苦味	0.0162±0.0021 <sup>b</sup>	0.0342±0.0017 <sup>a</sup>		
次黄嘌呤 HX	—	苦味	0.0826±0.0062 <sup>b</sup>	0.193±0.0035 <sup>a</sup>		
Σ呈味核苷酸 ΣFlavoring nucleotide			2.885±0.17 <sup>a</sup>	2.63±0.028 <sup>b</sup>		
K值 K value/%			8.805	21.305		

注：“—”表示未查到相关阈值和呈味特征；同行中不同字母间存在显著性差异 (P<0.05)；下同。

Note: “—” indicates that the relevant threshold and flavor characteristics are not found; values with different letters within the same line are significantly different (P<0.05). The same case in the following tables.

表2 两种养殖模式下金背鲤肌肉中游离氨基酸与滋味活性值  
Table 2 Amino acid and taste activity value in muscle of *C. carpio* var. *Jinbei* of FGF and FGP groups

氨基酸 Amino acid	阈值 <sup>[18-19]</sup> Threshold/ (g·kg <sup>-1</sup> )	呈味特征 <sup>[20-22]</sup> Taste characteristics	游离氨基酸含量 Free amino acid content/(g·kg <sup>-1</sup> )		滋味活性值 TAV	
			稻田放养 FGF	池塘养殖 FGP	稻田放养 FGF	池塘养殖 FGP
苏氨酸 Thr <sup>*</sup>	2.60	甜(+)	0.312±0.004 <sup>2b</sup>	0.362±0.004 <sup>1a</sup>	0.119	0.138
赖氨酸 Lys <sup>*</sup>	0.50	甜/苦(-)	0.254±0.008 <sup>1b</sup>	0.495±0.011 <sup>a</sup>	0.495	0.991
缬氨酸 Val <sup>▲</sup>	0.40	甜/苦(-)	0.297±0.003 <sup>1b</sup>	0.357±0.002 <sup>3a</sup>	0.737	0.888
蛋氨酸 Met <sup>▲</sup>	0.30	苦/甜/硫(-)	0.031±0.000 <sup>02b</sup>	0.045 <sup>9±0.000</sup> <sup>2a</sup>	0.103	0.153
色氨酸 Trp <sup>◆</sup>	0.90	苦/芳香(-)	0.028 <sup>4±0.000</sup> <sup>4a</sup>	0.025 <sup>6±0.000</sup> <sup>2b</sup>	0.035	0.031
苯丙氨酸 Phe <sup>◆</sup>	0.90	苦/芳香(-)	0.091±0.000 <sup>4b</sup>	0.119±0.002 <sup>7a</sup>	0.101	0.13
异亮氨酸 Ile <sup>▲</sup>	0.90	苦(-)	0.050 <sup>1±0.000</sup> <sup>6b</sup>	0.819±0.000 <sup>3a</sup>	0.055	0.091
亮氨酸 Leu <sup>▲</sup>	1.90	苦(-)	0.098 <sup>2±0.002</sup> <sup>6b</sup>	0.137±0.000 <sup>07a</sup>	0.051	0.072
Σ必需氨基酸 ΣEAA			1.162±0.019 <sup>b</sup>	1.623±0.021 <sup>a</sup>	1.69	2.49
组氨酸 His <sup>▲</sup>	0.20	酸/苦(-)	1.825±0.002 <sup>b</sup>	2.139±0.016 <sup>a</sup>	9.117	10.64
精氨酸 Arg <sup>▲</sup>	0.50	甜/苦(-)	0.081 <sup>6±0.001</sup> <sup>8b</sup>	0.181±0.001 <sup>a</sup>	0.161	0.36
Σ半必需氨基酸 ΣSEAA			1.907±0.003 <sup>8b</sup>	2.32±0.017 <sup>a</sup>	9.28	11.00
天冬氨酸 Asp <sup>*</sup>	0.03	鲜/酸(+)	0.028 <sup>1±0.000</sup> <sup>5a</sup>	0.014 <sup>3±0.000</sup> <sup>3b</sup>	0.923	0.483
谷氨酸 Glu <sup>*</sup>	0.05	鲜/酸(+)	0.114±0.001 <sup>4a</sup>	0.094 <sup>9±0.004</sup> <sup>b</sup>	2.268	1.954
丙氨酸 Ala <sup>*</sup>	0.60	鲜/甜(+)	0.315±0.015 <sup>a</sup>	0.251±0.014 <sup>b</sup>	0.542	0.401
丝氨酸 Ser <sup>*</sup>	1.50	甜(+)	0.131±0.002 <sup>7b</sup>	0.159±0.000 <sup>1a</sup>	0.086	0.106
甘氨酸 Gly <sup>*</sup>	1.30	甜(+)	1.088±0.017 <sup>a</sup>	0.905±0.001 <sup>8b</sup>	0.827	0.697
脯氨酸 Pro <sup>*</sup>	3.00	甜/苦(+)	0.124±0.001 <sup>6b</sup>	0.174±0.012 <sup>a</sup>	0.041	0.055
肌氨酸 Sar	—	—	0.125±0.012 <sup>a</sup>	0.122±0.001 <sup>a</sup>		
酪氨酸 Tyr <sup>◆</sup>	0.91	苦/芳香(-)	0.069 <sup>3±0.001</sup> <sup>5b</sup>	0.086 <sup>9±0.001</sup> <sup>a</sup>	0.075	0.095
半胱氨酸 Cys <sup>▲</sup>	—	苦/甜/硫(-)	0.639±0.027 <sup>a</sup>	0.550±0.007 <sup>b</sup>		
Σ非必需氨基酸 ΣNEAA			2.689±0.083 <sup>a</sup>	2.357±0.041 <sup>b</sup>	4.279	2.868
羟脯氨酸 Hyp	—	—	0.575±0.01 <sup>a</sup>	0.604±0.02 <sup>a</sup>		
谷氨酰胺 Gln	—	—	0.08±0.001 <sup>9b</sup>	0.102±0.000 <sup>9a</sup>		
天冬酰胺 Asn	—	—	0.003 <sup>1±0.000</sup> <sup>1a</sup>	0.003 <sup>4±0.000</sup> <sup>4a</sup>		
瓜氨酸 Cit	—	—	0.035 <sup>7±0.000</sup> <sup>6b</sup>	0.065 <sup>4±0.000</sup> <sup>1a</sup>		
游离氨基酸总量 Total free amino acid			6.361±0.12 <sup>b</sup>	7.137±0.098 <sup>a</sup>		
• 鲜味氨基酸总量/占比 Total delicious amino acid/Proportion			0.142 <sup>5±0.001</sup> <sup>9a</sup> /2.24%		0.109±0.004 <sup>2b</sup> /1.53%	
* 甜味氨基酸总量/占比 Total Sweet amino acid/Proportion			2.052±0.013 <sup>9</sup> /32.26%		2.031±0.033 <sup>9</sup> /28.46%	
▲ 苦味氨基酸总量/占比 Total bitter amino acid/Proportion			3.193±0.01 <sup>b</sup> /50.19%		3.836±0.007 <sup>1a</sup> /53.74%	
◆ 芳香氨基酸总量/占比 Total aromatic amino acids/Proportion			0.189±0.002 <sup>1b</sup> /2.96%		0.232±0.003 <sup>9a</sup> /3.25%	

于1, 但有研究表明, 呈味氨基酸对风味的贡献, 还需看游离氨基酸与其他风味成分的相互作用<sup>[23-24]</sup>。所以, 结合呈味核苷酸的分析结果, 在 FGF 组中高含量的 IMP 能与谷氨酸和天冬氨酸产生协同效

应, 使产品更具鲜味<sup>[25-26]</sup>。

### 2.3 不同养殖模式下金背鲤鱼肌肉中挥发性化合物组成分析

本研究首次采用 HS-GC-IMS 技术, 在两种养

殖模式的金背鲤肌肉中检测到 43 个峰, 40 种化合物, 其中定性出 37 种物质, 包括 10 种醛、14 种醇、6 种酮、3 种酸、2 种酯、1 种芳香烃、1 种醚 (表 3、图 6)。两种养殖模式的金背鲤肌肉中主要挥发性化合物为醛类 (9.54%~21.42%)、醇类 (12.79%~19.19%)、酮类 (55.46%~58.01%), 与 Lu 等<sup>[27]</sup> 检测的新鲜鲤肌肉中主要挥发性化合物的结果一致。在 10 种醛类化合物中, 两种养殖模式的金背鲤除丁醛无显著性差异外 ( $P>0.05$ ), 其余的醛类化合物均存在显著性差异 ( $P<0.05$ ); 在 14 种醇类化合物中, 1-丁醇、乙醇、芳樟醇、2-甲基-1-丁醇无显著性差异 ( $P>0.05$ ), 其他的存在显著性差异 ( $P<0.05$ ); 在 6 种酮类化合物中均存在显著性差异 ( $P<0.05$ )。而且从图 4 的指纹图谱可以明显看出, 两组金背鲤肌肉中挥发性化合物的差异性, FGF 组以壬醛、辛醛、庚醛、己醛、戊醛、E-2-己烯醛、苯甲醛、1-庚醇、1-戊烯-3-醇、芳樟醇、3-羟基-2-丁酮、3-辛酮、1-戊烯-3-酮、2-戊酮、甲酸丁酯、乙酸乙酯、 $\beta$ -罗勒烯、二甲基硫醚等化合物

为主, FGP 组以 2-丙酮、2-甲基丙酸、3-甲基丁酸、丙酸、1-辛烯-3-醇、Z-3-己烯醇、1-己醇、1-戊醇、2-甲基丁醇、3-甲基丁醇、1-丁醇、异丁醇、1-丙醇、2-丙醇、乙醇、2-丁酮、丙酮等为主。

由于挥发性化合物对总体风味的贡献大小取决于挥发性组分在风味体系中的浓度和感觉阈值。根据挥发性成分的相对百分含量和感觉阈值数值, 计算出挥发性风味化合物的 ROAV,  $ROAV \geq 1$  的化合物为样品的关键气味成分,  $0.1 \leq ROAV < 1$  的化合物对整体风味具有修饰作用。如表 3 中所示, FGF 组中关键气味化合物 ( $ROAV \geq 1$ ) 有 14 种: 壬醛、辛醛、庚醛、E-2-己烯醛、己醛、戊醛、2-甲基丁醛、3-甲基丁醛、丁醛、1-辛烯-3-醇、1-己醇、1-戊烯-3-酮、乙酸乙酯和  $\beta$ -罗勒烯; 对整体风味具有修饰作用的化合物 ( $0.1 \leq ROAV < 1$ ) 有正戊醇、1-戊烯-3-醇、3-辛酮、3-羟基-2-丁酮和二甲基硫醚。FGP 组中关键气味化合物 ( $ROAV \geq 1$ ) 与 FGF 组比, 缺  $\beta$ -罗勒烯, 共 13 种; 而对整体风味具有修饰作用的化合物 ( $0.1 \leq ROAV < 1$ ) 有正戊醇、

表3 两组养殖模式的金背鲤肌肉中挥发性化合物相对含量及其ROAV值

Table 3 Volatile compounds and relative odor activity value in muscle of *C. carpio* var. *Jinbei* of FGF and FGP groups  $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$

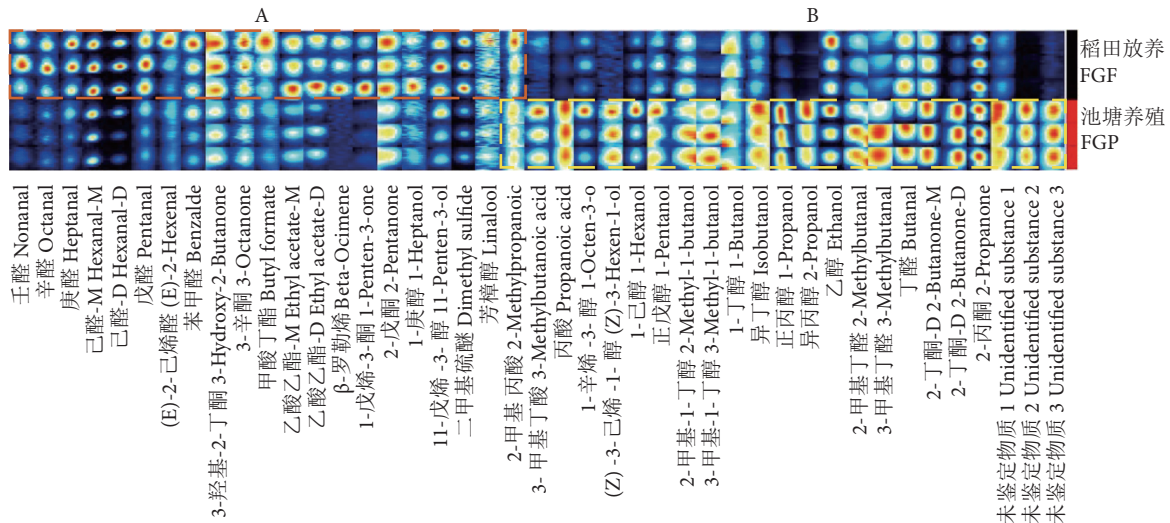
化合物 Compound	阈值 <sup>[28-29]</sup> Threshold/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	气味特征 <sup>[28]</sup> Odour characteristics	稻田放养 FGF		池塘养殖 FGP	
			相对含量 Relative content	相对气味 活度值 ROAV	相对含量 Relative content	相对气味 活度值 ROAV
醛类 Aldehydes			21.42%		9.54%	
壬醛 Nonanal	1	脂香、青草味	12.07±2.45 <sup>a</sup>	100	4.384±0.63 <sup>b</sup>	100
辛醛 Octanal	0.7	果香叶	6.32±1.1 <sup>a</sup>	74.80	3.633±0.49 <sup>b</sup>	43.01
庚醛 Heptanal	3	鱼腥、烤鱼、哈喇味	9.67±1.43 <sup>a</sup>	26.71	5.641±1.34 <sup>b</sup>	15.58
E-2-己烯醛 (E)-2-Hexenal	17	青香、脂香、果香味	3.42±1.48 <sup>a</sup>	1.67	2.54±0.26 <sup>b</sup>	1.24
己醛-M Hexanal-M	4.5	鱼腥、青草味	44.35±3.09 <sup>a</sup>	81.56	30.11±4.64 <sup>b</sup>	55.44
己醛-D Hexanal-D	4.5	鱼腥、青草味	31.66±3.85 <sup>a</sup>	58.29	11.60±4.72 <sup>b</sup>	21.36
戊醛 Pentanal	20	果香味	13.1±0.77 <sup>a</sup>	5.43	6.623±0.85 <sup>b</sup>	2.74
2-甲基丁醛 2-Methylbutanal	1	果香味	4.08±0.29 <sup>b</sup>	33.8	6.80±1.2 <sup>a</sup>	56.34
3-甲基丁醛 3-Methylbutanal	1.1	巧克力味、腐臭味	2.71±0.14 <sup>b</sup>	20.41	4.84±1.11 <sup>a</sup>	36.45
丁醛 Butanal	1.3	花香、水果香味	5.07±0.72 <sup>a</sup>	32.31	5.66±0.53 <sup>a</sup>	36.07
苯甲醛 Benzaldehyde	350	苦杏仁味	2.6±0.44 <sup>a</sup>	0.062	1.63±0.42 <sup>b</sup>	0.038
醇类 Alcohols			12.79%		19.19%	
1-庚醇 1-Heptanol	330	脂味、酒香	2.07±0.33 <sup>a</sup>	0.052	1.35±0.31 <sup>b</sup>	0.034
1-辛烯-3-醇 1-Octen-3-ol	10	蘑菇味、泥土味	3.64±0.54 <sup>b</sup>	3.16	5.80±2.38 <sup>a</sup>	4.81
1-己醇 1-Hexanol	5.6	青草味	3.38±0.54 <sup>b</sup>	5.00	6.22±2.01 <sup>a</sup>	9.20



续表 3

to be continued

化合物 Compound	阈值 <sup>[28-29]</sup> Threshold/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )	气味特征 <sup>[28]</sup> Odour characteristics	稻田放养 FGF		池塘养殖 FGP	
			相对含量 Relative content	相对气味 活度值 ROAV	相对含量 Relative content	相对气味 活度值 ROAV
正戊醇 1-Pentanol	150.2	面包酒香、果香	3.29±0.19 <sup>b</sup>	0.18	5.33±0.3 <sup>a</sup>	0.29
1-戊烯-3-醇 1-Penten-3-ol	358.1	肉香味、鱼腥味	10.68±1.09 <sup>a</sup>	0.25	9.03±2.05 <sup>b</sup>	0.021
1-丁醇 1-Butanol	5 000	温和的杂醇油气息	1.21±0.08 <sup>a</sup>	<0.01	1.04±0.07 <sup>a</sup>	<0.01
乙醇 Ethanol	100 000	酒味	29.21±6.39 <sup>a</sup>	<0.01	26.75±2.58 <sup>a</sup>	<0.01
异丙醇 2-Propanol	—	—	2.85±0.09 <sup>b</sup>		21.92±3.37 <sup>a</sup>	
3-甲基-1-丁醇 3-Methyl-1-butanol	250	发酵味、油脂味、	1.26±0.12 <sup>b</sup>	0.04	3.34±0.69 <sup>a</sup>	0.11
正丙醇 1-Propanol	8 505	—	18.04±1.36 <sup>b</sup>	0.018	80.69±4.78 <sup>a</sup>	0.079
异丁醇 Isobutanol	7 000	—	1.26±0.09 <sup>b</sup>	<0.01	2.16±0.27 <sup>a</sup>	<0.01
Z-3-己烯-1-醇 (Z)-3-Hexen-1-ol	250	—	0.39±0.06 <sup>b</sup>	0.013	1.15±0.04 <sup>a</sup>	0.038
芳樟醇 Linalool	30 000	热带香辛料味	1.96±0.14 <sup>a</sup>	<0.01	1.46±0.36 <sup>a</sup>	<0.01
2-甲基-1-丁醇 2-Methyl-1-butanol	1 200	—	1.4±0.04 <sup>a</sup>	<0.01	1.65±0.25 <sup>a</sup>	0.01
酮类 Ketones			55.46%		58.01%	
3-辛酮 3-Octanone	28	酮香、青香	2.35±0.15 <sup>a</sup>	0.70	1.76±0.31 <sup>b</sup>	0.52
3-羟基-2-丁酮 3-Hydroxy-2-butanone	800	脂香味	24.67±1.85 <sup>a</sup>	0.26	16.73±0.34 <sup>b</sup>	0.17
1-戊烯-3-酮 1-Penten-3-one	1	蘑菇味、烤焦味	4.54±1.32 <sup>a</sup>	37.61	1.72±0.16 <sup>b</sup>	14.25
2-戊酮 2-Pentanone	13 800	果味	4.7±0.2 <sup>a</sup>	<0.01	4.27±0.42 <sup>b</sup>	<0.01
2-丁酮-D 2-Butanone-D	50 000	醚香、果香、樟脑香	18.42±1.83 <sup>b</sup>	<0.01	72.65±3.42 <sup>a</sup>	0.012
2-丁酮-M 2-Butanone-M	50 000	醚香、果香、樟脑香	35.87±0.82 <sup>b</sup>	<0.01	40.29±1.69 <sup>a</sup>	<0.01
2-丙酮 2-Propanone	—	青草味	259.14±7.81 <sup>b</sup>		370.14±8.67 <sup>a</sup>	
酯类 Esters			2.06%		0.94%	
甲酸丁酯 Butyl formate	—		2.95±0.45 <sup>a</sup>		1.841±0.11 <sup>b</sup>	
乙酸乙酯-M Ethyl Acetate-M	5	醚香、果香	7.65±0.9 <sup>a</sup>	12.68	4.70±0.37 <sup>b</sup>	7.79
乙酸乙酯-D Ethyl Acetate-D	5	醚香、果香	2.36±0.5 <sup>a</sup>	3.91	1.72±0.29 <sup>a</sup>	2.85
酸类 Acids			1.25%		3.36%	
2-甲基丙酸 2-Methylpropanoic acid	—	—	2±0.12 <sup>a</sup>		2.14±0.15 <sup>a</sup>	
3-甲基丁酸 3-Methylbutanoic acid	—	—	0.57±0.07 <sup>b</sup>		1.44±0.12 <sup>a</sup>	
丙酸 Propanoic acid	—	—	5.29±0.75 <sup>b</sup>		25.86±0.47 <sup>a</sup>	
烃类 Hydrocarbon			0.77%		0.19%	
$\beta$ -罗勒烯 beta-Ocimene	34	脂香、甜味	4.85±0.69 <sup>a</sup>	1.18	1.65±0.77 <sup>b</sup>	0.40
醚类 Ethers			5.47%		1.86%	
二甲基硫醚 Dimethyl sulfide	300	果香、青香味	34.46±2.78 <sup>a</sup>	0.95	16.28±0.45 <sup>b</sup>	0.045
其他类 Others			0.78%		6.89%	
未鉴定物质1 Unidentified substance 1	—	—	2.49±0.34 <sup>b</sup>		7.76±0.33 <sup>a</sup>	
未鉴定物质2 Unidentified substance 2	—	—	2.04±0.04 <sup>b</sup>		50.80±4.06 <sup>a</sup>	
未鉴定物质3 Unidentified substance 3	—	—	0.41±0.03 <sup>b</sup>		1.71±0.06 <sup>a</sup>	



彩色虚线框内为含量较高的化合物, A 红色代表稻田养殖, B 黄色代表池塘养殖。

The compounds with higher contents are framed in the colored boxes; A red for FGF; B yellow for FGP.

图6 两种养殖模式的金背鲤肌肉中挥发性化合物GC-IMS 指纹图谱

Fig. 6 GC-IMS gallery plot of volatile compounds in muscle of *C. carpio* var. *Jinbei* of FGF and FGP groups

3-甲基 1-丁醇、3-辛酮、3-羟基-2-丁酮和  $\beta$ -罗勒烯。

#### 2.4 不同养殖模式下金背鲤肠道细菌与肌肉中风味化合物的相关性分析

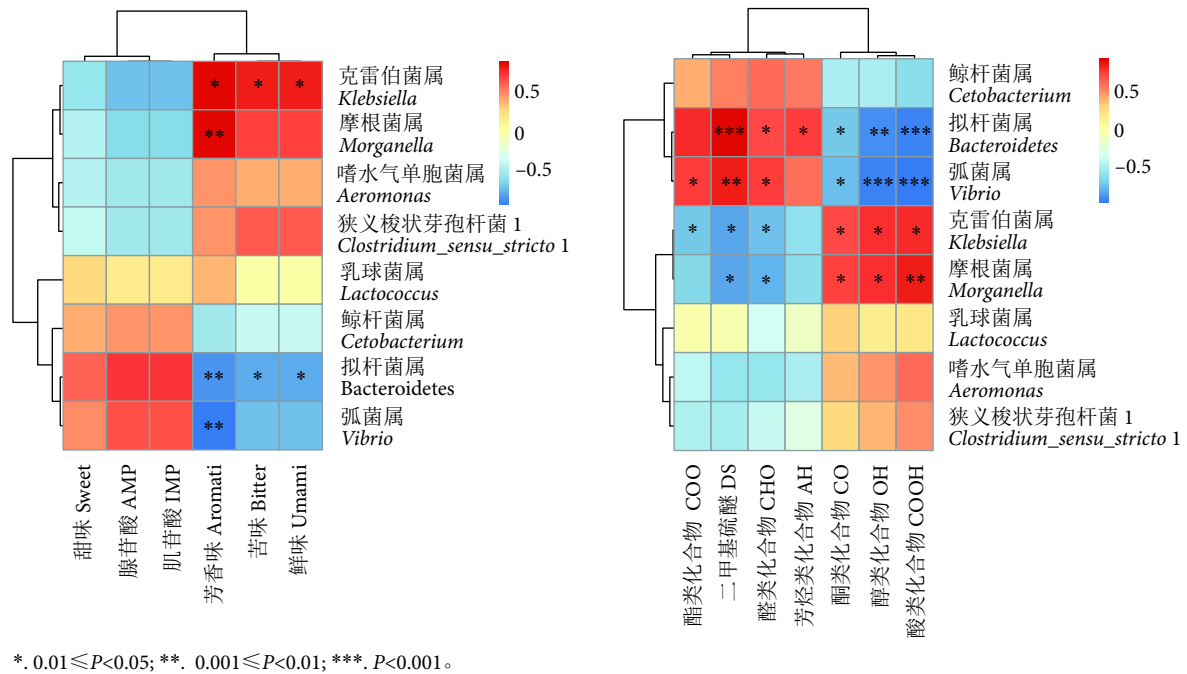
对主要菌群和风味物质进行相关性分析, 结果如图 7 所示, 肌苷酸、腺苷酸和甜味氨基酸与弧菌属、拟杆菌属、鲸杆菌属呈正相关, 与狭义梭状芽孢杆菌 1 (*Clostridium\_sensu\_stricto* 1)、嗜水气单胞菌、摩根菌属 (*Morganella*) 和克雷伯菌属呈负相关。芳香氨基酸与弧菌属、拟杆菌属存在极显著负相关性 ( $0.001 \leq P < 0.01$ ), 与摩根菌属和克雷伯菌属存在极显著正相关性 ( $0.001 \leq P < 0.01$ )。苦味和鲜味氨基酸与拟杆菌属呈显著负相关性 ( $P < 0.05$ ), 与克雷伯菌属呈显著正相关性 ( $P < 0.05$ )。酯类化合物 (COO)、醛类化合物 (CHO)、芳烃类化合物 (AH)、二甲基硫醚 (DS) 与拟杆菌属和弧菌属呈极显著正相关性 ( $P < 0.01$ ), 与克雷伯菌属和摩根菌属呈显著负相关性 ( $P < 0.05$ )。酮类化合物 (CO)、醇类化合物 (OH)、酸类化合物 (COOH) 与克雷伯菌属和摩根菌属呈显著正相关性 ( $P < 0.05$ ), 与拟杆菌属和弧菌属呈极显著负相关性 ( $P < 0.01$ )。

### 3 讨论

鱼类肠道微生物起源于水体环境和饵料, 其原始菌的建立则取决于水体及鱼卵表面的微生物种类<sup>[30]</sup>, 水体和饵料中的微生物通过鱼类的生活和摄食过程进入体内, 经过适应后定殖下来, 与宿主形成整体。多项研究发现鱼类等水生动物的遗传背

景、饲养环境、饲料类型等因素显著影响了其肠道菌群结构<sup>[31-32]</sup>。肠道菌群对鱼类的营养循环具有强烈的促进作用, 如变形菌门对多糖、蛋白质和其他有机物的降解和发酵极其重要<sup>[33]</sup>。厚壁菌门中的乳酸菌可以降低肠道的 pH, 增强水生动物的抗菌能力<sup>[34]</sup>。气单胞菌可以阻止病原菌在肠道和养殖环境中过度繁殖, 从而改善水体环境并提高宿主免疫力<sup>[35]</sup>。本研究对两种不同养殖模式下金背鲤的肠道菌群进行分析, 发现两组样本虽然在物种丰富度和均匀度上无显著性差异, 但其特征 OTU 值和菌落结构组成存在一定的差异, 稻田放养组主要为弧菌、拟杆菌、交替单胞菌、希瓦氏菌和嗜冷假单胞菌, 而池塘养殖组主要为莫拉克斯氏菌和克雷伯菌属。微生物与风味物质的相关性分析结果显示, 弧菌、拟杆菌、克雷伯氏杆菌和摩根菌属与不同的风味物质呈显著相关性 ( $0.01 \leq P < 0.05$  &  $0.001 \leq P < 0.01$  &  $P < 0.001$ ), 从而引起鱼肉风味的差异, 这可能是由于稻田环境给金背鲤提供了更加丰富多样的饵料, 以及水质环境和微生物等综合作用的结果。

核苷酸和游离氨基酸是水产品中重要的滋味物质<sup>[36]</sup>, 鲜味肌苷酸 IMP 具有较强的鲜味, 腺苷酸 AMP 具有鲜甜味<sup>[37-38]</sup>, 且两种核苷酸还能与谷氨酸和天冬氨酸产生协同效应, 使产品更具鲜味<sup>[23-24]</sup>, 其典型的滋味组分类型差异和共有组分含量差异会导致水产品不同的特征滋味<sup>[39]</sup>。本研究中两组养殖模式金背鲤的呈味核苷酸组成差异明显, 稻田放



\*.  $0.01 \leq P < 0.05$ ; \*\*.  $0.001 \leq P < 0.01$ ; \*\*\*.  $P < 0.001$ .

图7 肠道菌群结构与风味物质的相关性热图分析

Fig. 7 Correlation heat map analysis of intestinal flora structure and flavor substances

养组呈味核苷酸 IMP 高达  $1.676 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , TAV 为 6.705, 远超池塘养殖组; 游离氨基酸组成也存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 稻田放养组的谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸等关键氨基酸明显高于池塘养殖组。这可能是由于与单一的池塘养殖相比, 稻田放养的鱼类活动频率增加, 为鱼类提供了更多、更丰富的浮游生物和昆虫类天然饵料, 增加了其高蛋白质营养补给, 从而提升了鱼肉的鲜味。有大量研究数据验证了这一说法, 如吕敏等<sup>[40]</sup>报道稻田养殖黄颡鱼肌肉中的风味氨基酸含量显著高于池塘养殖组, 段青源等<sup>[41]</sup>报道野生大黄鱼的呈味氨基酸优于人工养殖的。

水产品中挥发性化合物组成是一个极其复杂的体系, 由各种风味前体物质经过酶解、自氧化和其他许多复杂的化学反应而生成<sup>[42]</sup>。通常认为醛类化合物主要来自于氨基酸的降解、多不饱和脂肪酸的氧化以及微生物的作用, 其阈值较低, 且具有气味加和作用<sup>[43]</sup>。两组养殖模式的醛类化合物的 ROAV 除苯甲醛小于 0.1 外, 其余醛类的相对气味活度值均大于 1, 对整体风味具有重要贡献。如己醛、庚醛、壬醛、戊醛等化合物已被证明与鲜鱼的香味相关联<sup>[44]</sup>, 而且在新鲜鱼中, 己醛通常产生一种原生味、鲜香的特征香味<sup>[45]</sup>; E-2-己烯醛呈现出果香、青香和明显的脂香气<sup>[42]</sup>; 2-甲基丁醛、3-

甲基丁醛在鳕 (*Gadus*) 中呈现特殊气味<sup>[46]</sup>。醇类化合物是由脂肪酸的氧化分解或羰基化合物还原产生的<sup>[47]</sup>, ROAV  $\geq 1$  的 1-辛烯-3-醇类似蘑菇气味, 是水生动植物肌肉中重要的风味物质<sup>[48]</sup>。酮类化合物是由氨基酸降解、不饱和脂肪酸热氧化降解和微生物作用产生<sup>[49]</sup>, 有研究报道酮类对消减腥味有一定的贡献<sup>[50]</sup>。如 1-戊烯-3-酮呈蘑菇味、烤焦味, ROAV 远远大于 1, 对整体风味贡献较大。酯类化合物中的乙酸乙酯具有果香味。因为水产品风味相当复杂, 并且能够与许多其他物质产生重叠的风味效应<sup>[51]</sup>。因此, 人们闻到的鱼味有可能是几类化合物协同作用的结果。

据报道, 鱼类肠道中某些微生物具有营养功能, 可以生成维生素和挥发性脂肪酸, 如 Sugita 等<sup>[52]</sup>发现淡水鱼类鲤、金鱼 (*Carassias auratas*)、罗非鱼等肠道菌群中有产生维生素 B<sub>12</sub> 的菌株; 李学梅<sup>[53]</sup>发现鲤体内脂肪积累与肠道中的拟杆菌呈负相关, 与厚壁菌呈正相关; Yang 等<sup>[54]</sup>研究发现草鱼肠道菌群显著富集与脂质代谢相关的基因 (甘油酯代谢、脂肪酸代谢、脂质生物合成)。部分鱼类肠道微生物的新陈代谢产物包括胞外酶, 可以对蛋白质和脂肪等起促进作用, 如 Asfie 等<sup>[55]</sup>发现在牙鲆 (*Paralichthys olivaceus*) 仔稚鱼消化道中分离出的弧菌有生产蛋白酶的能力。

本研究结果显示,不同养殖模式下,弧菌、拟杆菌、克雷白氏杆菌和摩根菌属与呈味核苷酸、游离氨基酸和挥发性化合物呈极显著相关性( $P<0.01$ ),推断养殖模式会影响鱼的肠道微生物及其风味品质,且稻田放养组的金背鲤品质特征优于池塘养殖组。

#### 参考文献:

- [1] 管卫兵,刘凯,石伟,等. 稻渔综合种养的科学范式[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5451-5464.
- [2] 王强盛,余坤龙,倪雪颖,等. 我国稻渔综合种养的发展过程及技术趋势[J]. 中国稻米, 2021, 27(4): 88-91.
- [3] 张学军. 稻田养鱼前景浅析[J]. 南方农业, 2018, 12(2): 96-99.
- [4] CHOWDHURY M T H, DEWAN S, WAHAB M A, et al. Water quality parameters of the rice fields used for rice cum fish culture[J]. Bangladesh J Fish, 2000, 23(1): 25-29.
- [5] 翟万营,郭安宁. 鱼类肠道微生物研究进展[J]. 河南水产, 2016(4): 18-21, 40.
- [6] 邹礼根,郭水荣,翁丽萍,等. 两种不同养殖模式对青鱼肌肉营养品质的影响[J]. 宁波大学学报(理工版), 2018, 31(4): 25-30.
- [7] 张艳霞,谢成民,周纷. 两种养殖模式大黄鱼肌肉营养价值评价及主体风味物质差异性分析[J]. 食品科学, 2020, 41(8): 220-227.
- [8] 秦晓. 养殖暗纹东方鲀风味物质鉴定分析[D]. 上海: 上海海洋大学, 2015: 3-13.
- [9] EDGAR R C. UPARSE: highly accurate OTU sequences from microbial amplicon reads[J]. Nat Methods, 2013, 10(10): 996-998.
- [10] SCHLOSS P D, WESTCOTT S L, RYABIN T, et al. Introducing mothur: open-source, platform-independent, community-supported software for describing and comparing microbial communities[J]. Appl Environ Microb, 2009, 75(23): 7537-7541.
- [11] WANG Q, GARRITY G M, TIEDJE J M, et al. Naive Bayesian classifier for rapid assignment of rRNA sequences into the new bacterial taxonomy[J]. Appl Environ Microbiol, 2007, 73(16): 5261-5267.
- [12] 徐永霞,李鑫晰,赵洪雷,等. 六种海水鱼类鱼汤的呈味物质比较分析[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(21): 240-245.
- [13] 刘登勇,周光宏,徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法:“ROAV”法[J]. 食品科学, 2008, 29(7): 370-374.
- [14] 朱昊俊,强俊,徐钢春,等. 哈尼梯田稻-渔共作模式下杂交黄颡鱼肠道微生物研究[J]. 水生生物学报, 2021, 45(6): 1232-1242.
- [15] WU S G, WANG G T, ANGERT E R, et al. Composition, diversity and origin of the bacterial community in grass carp intestine[J]. PLoS One, 2012, 7(2): e30440.
- [16] ZHU H J, QIANG J, TAO Y F, et al. Physiological and gut microbiome changes associated with low dietary protein level in genetically improved farmed tilapia (GIFT, *Oreochromis niloticus*) determined by 16S RNA sequence analysis[J]. Microbiologyopen, 2020, 9(5): e1000.
- [17] 陈剑岚,陈舜胜,施文正,等. 大小草鱼肉呈味水溶性成分的比较[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(1): 213-217.
- [18] 王雪峰,李春萍,吴佳佳,等. 臭鳊鱼发酵中滋味成分的鉴定与分析[J]. 中国食品学报, 2015, 15(1): 222-229.
- [19] 蒋滢,徐颖,朱庚伯. 人类味觉与氨基酸味道[J]. 氨基酸和生物资源, 2002, 24(4): 1-3.
- [20] 邱伟强,刘冰宣,陈舜胜,等. 法快速测水产品中游离芳香族氨基酸含量的研究[J]. 上海海洋大学学报, 2013, 22(4): 629-633.
- [21] 陈剑岚,邵琳雅,施文正,等. 不同宰杀方式对草鱼肉呈味水溶性成分的影响[J]. 食品科学, 2016, 37(17): 27-31.
- [22] 高琴,安碛琦,陈周,等. 短时微流水处理对池塘养殖鳊鱼肌肉滋味品质的影响[J]. 水生生物学报, 2021, 45(5): 1057-1066.
- [23] LIOE H N, APRIYANTONO A, TAKARA K, et al. Umami taste enhancement of MSG/NaCl mixtures by subthreshold L- $\alpha$ -aromatic amino acids [J]. J Food Sci, 2006, 70(7): 401-405.
- [24] 张秀洁,郭全友,王鲁民,等. 养殖大黄鱼滋味和气味物质组成及评价[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(20): 242-249.
- [25] 陈德慰,苏键,刘小玲,等. 广西北部湾3种贝类中主要呈味物质的测定及呈味作用评价[J]. 食品科学, 2012, 33(10): 165-168.
- [26] 姜万舟,汪倩,王瑞花,等. 挂糊鳊鱼块油炸工艺优化及不同工艺对非挥发性呈味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2016, 37(7): 182-187, 192.
- [27] LU Q, LIU F F, BAO J Q. Volatile components of American silver carp analyzed by electronic nose and MMSE-GC-MS-O[J]. J Food Biochem, 2019, 43(11): 13006.
- [28] 陈实,施文正,汪之和. 青鱼背肉、腹肉和尾肉不同风味成分的比较[J]. 渔业现代化, 2021, 48(1): 58-66.
- [29] 余远江,庞一扬,袁桃静,等. 基于电子鼻、HS-GC-IMS和HS-SPME-GC-MS分析五种水产原料的风味特征[J]. 食品工业科技, 2021, 42(19): 106-117.
- [30] HANSEN G H, OLAFSEN J A. Bacterial colonization of cod (*Gadus morhua* L.) and halibut (*Hippoglossus hippoglossus*) eggs in marine aquaculture[J]. Appl Environ Microbiol, 1989, 55(6): 1435-1446.
- [31] 赵月季,郭海朋,张德民. 不同养殖模式对凡纳滨对虾肠道微生物群落的影响[J]. 水产学报, 2021, 45(2): 221-234.
- [32] NI J J, YAN Q Y, YU Y H, et al. Factors influencing the grass carp gut microbiome and its effect on metabolism[J]. Fems Microbiol Ecol, 2014, 87(3): 704-714.
- [33] FJELLHEIM A J, KLINKENBERG G, SKJERMO J, et al. Selection of candidate probiotics by two different screening strategies from Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) larvae[J]. Vet microbiol, 2020, 144(1): 153-159.
- [34] KLEWICKI R, KLEWICKA E. Antagonistic activity of lactic acid bacteria as probiotics against selected bacteria of the Enterobacteriaceae family in the presence of polyols and their galactosyl derivatives[J]. Biotechnol Lett, 2004, 26(4): 317-320.
- [35] SAHU M K, SWARNAKUMAR N S, SIVAKUMAR K, et al. Probiotics in aquaculture: importance and future perspectives[J]. Ind J



- Microbiol, 2008, 48(3): 299-308.
- [36] 刘源, 崔智勇, 周雪珂, 等. 水产品滋味研究进展 [J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(1): 22-29.
- [37] 刘亚, 章超桦, 陆子锋. 高效液相色谱法检测水产品中的ATP关联化合物 [J]. 食品与发酵工业, 2010, 36(6): 137-141.
- [38] ZHANG J H, XU Y S, XIA W S, et al. Dynamics and diversity of microbial community succession during fermentation of Suan yu, a Chinese traditional fermented fish, determined by high throughput sequencing[J]. Food Res, 2018, 111: 565-573.
- [39] ZHANG N L, AYED C, WANG W L, et al. Sensoryguided analysis of key taste-active compounds in pufferfish (*Takifugu obscurus*)[J]. J Agric Food Chem, 2019, 67(50): 13809-13816.
- [40] 吕敏, 甘晖, 陈田聪, 等. 瓦氏黄颡鱼在稻田和池塘养殖中的生长性能和肌肉品质比较 [J]. 水产学杂志, 2022, 35(1): 75-81.
- [41] 段青源, 钟惠英, 斯列钢, 等. 网箱养殖大黄鱼与天然大黄鱼营养成分的比较分析 [J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2000, 19(2): 125-128.
- [42] 陆大鹏. 水产品挥发性成分的研究进展 [J]. 食品安全导刊, 2022(3): 142-145.
- [43] 吴永俊, 王玉涛, 施文正, 等. 不同产地虹鳟鱼肉风味物质的比较 [J]. 上海海洋大学学报, 2017, 26(6): 888-899.
- [44] 张青, 王锡昌, 刘源. SDE-GC-Olfactometry 联用研究鲢鱼肉的挥发性气味活性物质 [J]. 安徽农业大学学报, 2009, 37(4): 1407-1409, 1425.
- [45] 赵庆喜, 薛长湖, 徐杰, 等. 微波蒸馏-固相微萃取-气相色谱-质谱-嗅觉检测器联用分析鲮鱼鱼肉中的挥发性成分 [J]. 色谱, 2007, 25(2): 267-271.
- [46] MILO C, GROSCH W. Changes in the odorants of boiled salmon and cod as affected by the storage of the raw material[J]. J Agric Food Chem, 1996, 44(8): 2366-2371.
- [47] 郝淑贤, 叶鸽, 李来好, 等. 不同养殖模式罗非鱼的挥发性成分分析 [J]. 食品与发酵工业, 2016, 42(6): 147-152.
- [48] 解万翠, 卢宽, 于靖, 等. 水产品香气研究进展 [J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(1): 11-21.
- [49] 曹静, 张凤桦, 龙斌, 等. 野生和养殖长吻鮠肌肉挥发性风味成分分析 [J]. 食品科学, 2015, 36(16): 170-174.
- [50] 顾赛麒, 唐锦晶, 周绪霞, 等. 腌腊鱼传统日晒干制过程中品质变化与香气形成 [J]. 食品科学, 2019, 40(17): 36-44.
- [51] MIYASAKI T, HAMAGUCHI M, YOKOYAMA S. Change of volatile compounds in fresh fish meat during ice storage[J]. J Food Sci, 2011, 76(9): 1319-1325.
- [52] SUGITA H, MIYAJIMA C, DEGUCHI Y. The Vitamin B12-producing ability of intestinal microflora isolated from tilapia and channel catfish[J]. Bull Jpn Soc Sci Fish, 1990, 56(4): 701-704.
- [53] 李学梅. 鲤科鱼类肠道微生物与宿主关系研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2012: 89.
- [54] YANG G, JIAN S Q, CAO H Z, et al. Changes in microbiota along the intestine of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*): community, interspecific interactions, and functions[J]. Aquaculture, 2019, 498: 151-161.
- [55] ASFIE M, YANAGI H, OKANO R, et al. The protease-producing ability of *Vibrios* isolated from larvae and juveniles of Japanese flounder[J]. Aquac Sci, 2000, 48(1): 139-140.