

# 传统养殖与组合湿地-池塘循环水养殖 黄颡鱼的品质比较

李温蓉<sup>1</sup>, 安玥琦<sup>1</sup>, 陶玲<sup>2</sup>, 温利<sup>1</sup>, 刘茹<sup>1,3</sup>, 李谷<sup>2</sup>, 熊善柏<sup>1,3\*</sup>

(1. 华中农业大学食品科学技术学院, 国家大宗淡水鱼加工技术研发分中心, 湖北武汉 430070)

(2. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 湖北武汉 430223)

(3. 长江经济带大宗水生生物产业绿色发展教育部工程研究中心, 湖北武汉 430070)

**摘要:** 为比较传统养殖与组合湿地-池塘循环水养殖黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*) 的品质差异, 该研究对养殖池塘水质进行评价的同时, 利用超高效液相色谱、气相色谱-质谱联用等技术分析了组合湿地-池塘循环水及传统池塘养殖黄颡鱼的外观及质地品质、营养品质、风味品质。结果表明, 组合湿地-池塘循环水池塘水质污染程度较低、水体富营养化程度减缓且其中养殖的黄颡鱼肌肉空壳率、亮度及白度值显著高于传统组, 肌肉的蒸煮损失率显著降低。湿地组黄颡鱼必需氨基酸/总氨基酸为 40.40%, 必需氨基酸/非必需氨基酸为 78.67%, 肌肉氨基酸组成更符合 FAO/WTO 推荐的理想蛋白模式。湿地组黄颡鱼不饱和脂肪酸、Omega-3 脂肪酸及 Omega-6 脂肪酸含量分别为传统组的 3.78 倍、2.64 倍以及 3.25 倍。湿地组黄颡鱼中呈油脂味等异味的挥发性气味物质含量下降, 且呈苦味及酸味的氨基酸总占比下降, 呈鲜味及甜味的氨基酸总占比上升, 呈鲜味的 IMP 含量为传统组的 3.16 倍, 呈苦味的 HxR 及 Hx 含量较传统组下降了 17.00% 及 17.57%。综上, 组合湿地-池塘循环水养殖黄颡鱼可食用部分占比更高, 肉质更为白亮, 肌肉营养组成更优、风味品质更佳。该研究可为黄颡鱼品质的提升及组合湿地-池塘循环水养殖模式的推广提供理论支持。

**关键词:** 黄颡鱼; 质地品质; 营养品质; 风味品质; 传统养殖; 组合湿地-池塘循环水养殖

文章编号: 1673-9078(2023)05-14-24

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2023.5.0566

## Comparison of the Quality of *Pelteobagrus fulvidraco* Cultured Conventionally and by the Wetland-recirculating Water Pond Combination

LI Wenrong<sup>1</sup>, AN Yueqi<sup>1</sup>, TAO Ling<sup>2</sup>, WEN Li<sup>1</sup>, LIU Ru<sup>1,3</sup>, LI Gu<sup>2</sup>, XIONG Shanbai<sup>1,3\*</sup>

(1. College of Food Science and Technology Huazhong Agricultural University, National R & D Branch Center for Conventional Freshwater Fish Processing (Wuhan), Wuhan 430070, China)

(2. Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China)

(3. Engineering Research Center of Green Development for Conventional Aquatic Biological Industry in the Yangtze River Economic Belt, Ministry of Education, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** In order to compare the difference in the quality of *Pelteobagrus fulvidraco* cultured conventionally and by the wetland-recirculating water pond combination, the water quality of the aquaculture ponds was evaluated in this study. Meanwhile, techniques such as ultra-performance liquid chromatography (UPLC) and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) were used to analyze the appearance and textural quality, nutritional quality and flavor quality of *P. fulvidraco* cultured in the wetland-recirculating water pond combined system and in conventional pond. The results indicated that the water in the wetland-recirculating water pond combined system was less

引文格式:

李温蓉, 安玥琦, 陶玲, 等. 传统养殖与组合湿地-池塘循环水养殖黄颡鱼的品质比较[J]. 现代食品科技, 2023, 39(5): 14-24.

LI Wenrong, AN Yueqi, TAO Ling, et al. Comparison of the quality of *Pelteobagrus fulvidraco* cultured conventionally and by the wetland-recirculating water pond combination [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(5): 14-24.

收稿日期: 2022-05-06

基金项目: 国家现代农业产业技术体系 (CARS-45)

作者简介: 李温蓉 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 水产品加工及贮藏, E-mail: lwrong@webmail.hzau.edu.cn

通讯作者: 熊善柏 (1963-), 男, 教授, 研究方向: 水产品加工及贮藏, E-mail: xionsb@mail.hzau.edu.cn

polluted, the degree of eutrophication of the water body was suppressed, the empty shell rate, brightness and whiteness of the muscle of the *P. fulvidraco* cultured in combined system were much higher, and the muscle's cooking loss rate was significantly reduced, compared with those of the conventional group. The essential amino acid/ total amino acid ratio and essential amino acid/ non-essential amino acid ratio of the wetland group were 40.40% and 78.67%, correspondingly, and the amino acid composition of the muscle was more in line with the ideal protein pattern recommended by FAO/WTO. The contents of unsaturated fatty acids, Omega-3 fatty acids and Omega-6 fatty acids of the wetland group were 3.78, 2.64 and 3.25 times that of the traditional group, respectively. In the wetland group, the content of volatile odor substances with unpleasant odor like oily odor also decreased, the total proportion of bitter and sour amino acids decreased, whilst the total proportion of umami and sweet amino acids increased, and the content of IMP with umami taste was 3.16 times that of the traditional group. Compared with the conventional group, the amounts of bitter HxR and Hx decreased by 17.00% and 17.57%, respectively. In summary, the *P. fulvidraco* cultivated in the wetland-recirculating water pond had a higher proportion of edible parts, whiter and brighter meat, a better nutritional composition of muscle, and a superior flavor quality. This study can provide theoretical support for the improvement of the quality of *P. fulvidraco* and the promotion of the wetland-recirculating water pond combined culture mode.

**Key words:** *Pelteobagrus fulvidraco*; texture quality; nutritional quality; flavor quality; conventional culture; combine wetland-pond circulating water culture

黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*) 俗称黄骨鱼, 属鲇形目 (Siluriformes)、鲿科 (Bagridae), 其生长速度快、易于存养、肉质细嫩、口感鲜美、营养丰富, 是养殖者及消费者喜爱的淡水经济鱼种之一<sup>[1]</sup>。2020年, 我国黄颡鱼总产量达 55.55 万 t, 同比增长 5.31%, 是我国重要的淡水养殖鱼类<sup>[2]</sup>。

目前, 黄颡鱼的养殖多以池塘养殖为主。但黄颡鱼属于无鳞鱼类, 不同于四大家鱼, 其抗病性差, 幼苗对水环境因子敏感, 导致种苗成活率较低, 制约了黄颡鱼产业发展<sup>[3]</sup>。近年来, 科研工作者基于淡水鱼类养殖系统在养殖环境改造、养殖尾水处理与循环等方面做了进一步改善<sup>[4,5]</sup>, 现已拓展出组合湿地-池塘循环水养殖等多种以池塘为基础的生态循环养殖模式<sup>[4]</sup>。组合湿地-池塘循环水养殖模式是指将池塘养殖尾水进入人工湿地进行实现异地净化处理后, 经循环转入池塘中再利用, 实现了人工湿地与池塘养殖的有机结合, 是当前绿色池塘生态养殖模式之一<sup>[6]</sup>。

鱼类的品质一般包括质地、表观特性、营养价值和风味品质等方面<sup>[7]</sup>。养殖模式对鱼肉品质具有重要影响。研究表明, 与传统池塘养殖相比, 在稻田养殖、湖泊养殖及流水养殖等养殖模式下黄颡鱼具有更优的生长指标及更高的成活率<sup>[8]</sup>、鱼体肌肉的营养成分含量更高<sup>[9]</sup>、肌肉鲜味提升<sup>[10]</sup>。然而目前关于组合湿地-池塘循环水养殖的研究多集中于尾水净化效果<sup>[11]</sup>、微生物菌群<sup>[12]</sup>等, 尚未见该模式对养殖黄颡鱼肌肉品质影响的相关报道。因此, 本研究以组合湿地-池塘循环水养殖的黄颡鱼为研究对象, 以传统池塘养殖黄颡鱼为对照, 分析其表观及质地品质、营养品质以及风味品质, 为黄颡鱼品质的提升及组合湿地-池塘循环水养殖模式的推广提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 组合湿地-池塘循环水养殖系统组成和运行

组合湿地-池塘循环水养殖系统由养殖池塘和组合湿地两部分构成, 池塘进行鱼类养殖, 人工湿地作为池塘养殖尾水净化单元, 二者有机结合形成复合循环水养殖系统, 其示意图如图 1 所示。组合湿地由进水区、上行流湿地 I 区、汇水区、上行流湿地 II 区和出水区组成, 以上各部分之间均由不透水墙隔开。组合湿地的详细构造可参照孙瑞萌<sup>[13]</sup>的研究。湿地进水端设置前置区, 前置区由一台水泵和过滤池组成。池塘养殖尾水在前置区经水力提升后进入组合湿地进行净化处理, 再回流到养殖池塘进行循环利用。组合湿地采取间歇进水的方式运行, 水力负荷为  $5.54 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ , 平均运行时间为 4 h, 池塘日换水量为 8.44%~9.49%。

池塘主养品种为黄颡鱼, 鱼苗放养初始平均体质量 27.12 g, 每  $667 \text{ m}^2$  投放 6 670 尾; 配养品种为草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*), 鱼苗放养初始平均体质量 204.61 g, 每  $667 \text{ m}^2$  投放 130 尾, 池塘水深 1.5 m, 养殖周期约 60 d, 投喂饲料使用黄颡鱼专用膨化资料 (荆州益农饲料有限公司), 饲料主要营养成分如下: 蛋白含量 40%, 粗纤维 400g, 氨基酸  $\geq 18\%$ , 磷 0.7%, 钾 10 000 mg, 钙 0.5%, 镁 2 000 mg, 锌 29 mg, 铁 100 mg, 灰分 6%, 水分 15%。

以传统池塘养殖模式为对照, 其池塘面积、鱼苗放养以及生产管理与循环水养殖池塘完全一致, 养殖管理按常规方式进行。两种模式池塘养殖期间均不换水, 只补充因蒸发、渗漏等损失的池水, 补充水体为地下水 and 自然降雨。

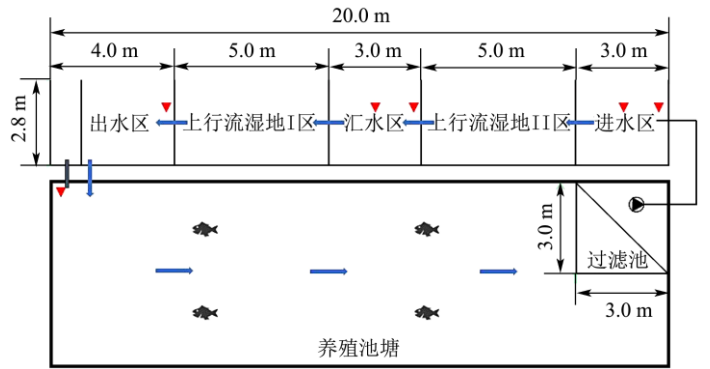


图1 组合湿地-池塘循环水养殖系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of combined wetland-pond circulating water aquaculture system

### 1.2 实验材料

实验用鱼均为放养 150 d 后的黄颡鱼，其中，传统池塘养殖黄颡鱼（简称传统组），平均体质量 0.104 kg，平均体长 21.71 cm；组合湿地-池塘循环水养殖黄颡鱼（简称湿地组），平均体质量 0.138 kg，平均体长 23.79 cm，均来自于中国水产科学研究院池塘生态工程技术研究中心（湖北荆州），两种养殖模式下的黄颡鱼鲜鱼运输至中心实验室宰杀后，测量形体指标，随后去头、去内脏，取鱼背部肌肉液氮冷冻运至实验室用于后续指标分析。

实验所使用的乙醚、石油醚（沸程 30~60 °C）、φ=95%乙醇、盐酸、氢氧化钠均为分析纯，购于国药集团化学试剂有限公司；异硫氰酸苯酯、三乙胺均为优级纯，购于国药集团化学试剂有限公司；甲醇、乙腈、正己烷、氨基酸混标均为色谱级，购于上海安谱实验科技股份有限公司；核苷酸标品、脂肪酸甲酯混标均为色谱级，购于美国 Sigma-Aldrich 公司。乙醇、环己酮均为色谱纯，购于上海源叶生物科技有限公司。

### 1.3 主要设备

FA-1004 电子分析天平，上海舜宇恒平科学仪器有限公司；BR4I 型离心机，美国 Thermo Fisher 公司；CR-400 型色差仪，日本 KonicaMinolta 公司；TA-XTPlus 型质构分析仪，英国 Stable Micro Systems 公司；8890-7000D 型气相色谱质谱联用仪、1260 型液相色谱仪、7890A 型气相色谱仪，美国 Agilent 科技公司；PAL RTC 120 自动进样器，瑞士 CTC 公司。

### 1.4 实验方法

#### 1.4.1 形体指标测定

对黄颡鱼采样宰杀时记录其体长 ( $L$ )、体质量 ( $W$ )、内脏质量 ( $W_1$ )、去头去内脏后体质量 ( $W_L$ )、其脏体指数脏体指数 (Viscerosomatic Index, VI, %)、

空壳率空壳率 (Hepatosomatic Index, HI, %) 及肥满度 (Condition Factor, CF,  $g/cm^3$ ) 按下述公式计算<sup>[14]</sup>:

$$VI = \frac{W_1}{W_0} \times 100\% \quad (1)$$

$$HI = \frac{W_L}{W_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$CF = \frac{W_0}{L^3} \quad (3)$$

式中:

- $L$ ——黄颡鱼体长, cm;
- $W_0$ ——黄颡鱼体质量, g;
- $W_1$ ——黄颡鱼内脏质量, g;
- $W_L$ ——去头去内脏后质量, g;
- VI——脏体指数, %;
- HI——空壳率, %;
- CF——肥满度,  $g/cm^3$ 。

#### 1.4.2 色度测定

将鱼背部肌肉切成长、宽、高为 3 cm×3 cm×1 cm 的规格，采用 CR-400 色差仪对样品进行色度测定。分别记录背部肌肉的色差值  $L^*$  (亮度值)、 $a^*$  (红绿值)、 $b^*$  (黄蓝值)。白度计算公式如下所示<sup>[15]</sup>:

$$W = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + (a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (4)$$

式中:

- $W$ ——白度;
- $L^*$ ——亮度值;
- $a^*$ ——红绿值;
- $b^*$ ——黄蓝值。

#### 1.4.3 全质构测定

参考陈东清<sup>[16]</sup>所述方法使用 TA-XTPlus 物性测试仪测定鱼背部肌肉的质构特性。将鱼肉切成长、宽、高为 1.5 cm×1.5 cm×1 cm 的长方体，将靠近鱼皮面朝下放置在测试仪探头正下方的平台上。采用全质构分析模式，每个样品进行两次轴向压缩，压缩比为 50%，

测试探头使用 P/36 R, 测前、中、后速度分别为 5、1、5 mm/s。

#### 1.4.4 蒸煮损失率测定

黄颡鱼的持水性可采用蒸煮损失率表示, 损失越大代表持水性越差。参考刘云轩<sup>[17]</sup>的方法并稍作修改, 取于 4 °C 解冻 12 h 的黄颡鱼用滤纸吸干表面水分后称重计为  $m_1$ , 随后将其置于蒸锅中蒸制 5 min 后, 置于常温冷却, 用滤纸吸干表面水分并称质量  $m_2$ , 按照下式计算蒸煮损失率<sup>[18]</sup>:

$$R = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (5)$$

式中:

$R$ —蒸煮损失率, %;

$m_1$ —蒸煮前黄颡鱼的质量, g;

$m_2$ —蒸煮后黄颡鱼的质量, g。

#### 1.4.5 营养成分测定

常规营养成分的测定均选取黄颡鱼背部肌肉为样品, 其中, 水分含量的测定参考 GB 5009.3-2016《食品中水分的测定》中直接干燥法; 粗灰分含量测定参考 GB 5009.4-2016《食品中灰分的测定》中马弗炉高温灼烧法; 粗蛋白质含量参考 GB 5009.5-2016《食品中蛋白质的测定》中凯氏定氮法测定; 粗脂肪含量参考 GB 5009.6-2016《食品中脂肪的测定》中索氏抽提法。鱼肉中脂肪酸的组成及含量测定参照 GB 5009.168-2016《食品中脂肪酸的测定》; 鱼肉中氨基酸的组成及含量测定参照 GB 5009.124-2016《食品中氨基酸的测定》并根据文献<sup>[19]</sup>所述方法稍作修改。

#### 1.4.6 核苷酸及其降解产物的测定

核苷酸及其降解产物的提取参考刘敬科<sup>[20]</sup>的方法。准确称取 5.00 g 样品, 置于离心管中并加入 25 mL 5% 高氯酸溶液, 于冰浴中用高速分散均质机于 8 000 r/min 均质两次, 每次 20 s。随后于 4 °C 1 000 r/min 离心 10 min 后吸取上清液, 用 NaOH 调节 pH 值为 6.5, 用高纯水定容至 100 mL 后经 0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤待测。含量测定采用超高效液相色谱进行测定, 主要技术参数参照 Luo 等<sup>[21]</sup>的方法。

#### 1.4.7 挥发性气味物质测定

挥发性气味物质的测定参照杨姣等<sup>[22]</sup>的方法并稍作修改。取 5.0 g 斩碎的鱼背部肌肉放入 20 mL 顶空气相瓶中, 加入 1  $\mu\text{L}$  内标环己酮 (1 000  $\mu\text{g}/\text{mL}$ ), 再加入 10 mL 饱和氯化钠溶液后立即封盖待测。采用气相色谱质谱进行测定, 主要技术参数参照杨姣等<sup>[22]</sup>的方法。经气相色谱-质谱仪分离鉴定的物质在 NIST 及 Flavor 谱库中检索, 利用面积归一化法计算各挥发性物质的相对含量。

#### 1.4.8 滋味活度值及相对气味活度值计算

根据下式计算滋味活度值及气味活度值以评价两种养殖模式下黄颡鱼肌肉风味品质:

$$TAV = C_i / T_i;$$

$$ROAV \approx 100 \times \frac{C_i}{C_{\max}} \times \frac{T_{\max}}{T_i} \quad (6)$$

式中:

$TAV$ —滋味活度值;

$ROAV$ —相对气味活度值;

$C_i$ 、 $T_i$ —分别为滋味物质含量及阈值;

$C_i$ 、 $T_i$ —对应挥发性物质的百分比含量和感觉阈值,  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ;

$C_{\max}$ 、 $T_{\max}$ —所有风味物质中  $C_{\max}$ 、 $T_{\max}$  最大的百分比含量和感觉阈值,  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

#### 1.4.9 感官评价

将黄颡鱼肌肉于 -80 °C 冰箱取出后置于 4 °C 冰箱解冻 12 h, 蒸制 10 min 后进行感官评价。感官评定小组由 10 位 (5 男, 5 女) 受过专业训练的品评员组成。感官评价标准参考陈周等<sup>[23]</sup>的方法。感官评价在感官分析室进行, 每次评价由每个评价员单独进行, 不互相交流, 并且在每个样品评价之间用清水漱口, 排除样品间的影响。

#### 1.4.10 池塘水质评价

传统池塘 (为与养殖组作区分, 水质评价部分简称对照塘) 和组合湿地-池塘循环水 (为与养殖组作区分, 水质评价部分简称循环塘) 中氨态氮 ( $\text{TAN}$ )、非离子氨 ( $\text{NH}_3\text{-N}$ )、亚硝态氮 ( $\text{NO}^2\text{-N}$ )、硝态氮 ( $\text{NO}^3\text{-N}$ )、总氮 ( $\text{TN}$ )、总磷 ( $\text{TP}$ )、溶解氧 ( $\text{DO}$ )、水体透明度 ( $\text{SD}$ )、叶绿素 a ( $\text{Chl a}$ ) 等指标的测定及计算均参照孙瑞萌<sup>[13]</sup>方法。

### 1.5 数据分析

实验均重复 3 次。样品色度及质构特性参数平行测定 6 次, 其他指标平行测定 3 次。结果均以“平均值  $\pm$  标准差”表示。实验数据采用 Excel 2019 软件处理, 采用 SPSS 25 软件对数据进行单因素方差分析, 显著性差异检测限  $P < 0.05$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 两种养殖模式池塘水质差异

系统运行期间对照塘和循环塘水质评价如表 1。由表 1 可知, 对照塘  $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}^2\text{-N}$ 、 $\text{NO}^3\text{-N}$ 、 $\text{TN}$  和  $\text{TP}$  的单项污染指数均大于 1, 说明对照塘已受到这些物质的污染, 而循环塘只有  $\text{NO}^3\text{-N}$ 、 $\text{TN}$  和  $\text{TP}$  大

于 1，另外对照塘 DO 的单项污染指数比循环塘高 38.32%，显示循环塘溶氧环境优于对照塘。循环塘水体中 TAN、NH<sub>3</sub>-N、NO<sup>2</sup>-N、TP 和 DO 的超标率均低于对照塘，说明试验期间循环塘水体保持清洁的时间较长。对照塘中 NH<sub>3</sub>-N、NO<sup>2</sup>-N 平均浓度的超标倍数分别为 0.50、1.00，而循环塘均未超标，对照塘其他污染物的超标倍数也均高于循环塘。传统池塘中主要污染物为 NO<sup>2</sup>-N、TN 和 TP，其污染负荷比分别为 17.27、24.64 和 15.28，组合湿地-池塘循环水池塘中主要污染物为 NO<sup>3</sup>-N、TN 和 TP，其污染物负荷比分别为 12.91、30.69 和 21.24。根据池塘水质分级标准可知，循环塘和对照塘总体水质均为中污染程度，但循环塘综合污染指数比对照塘低 19.45%，即循环塘污染程度较轻。

试验期间，养殖池塘单项营养状态指数如表 2 所示，池塘综合营养指数如图 2 所示。由表 2 可知，随养殖生产的进行，Chl *a*、TN 和 TP 的营养状态指数均呈先上升后下降的趋势，而 SD 的营养状态指数呈先下降后上升趋势。由图 2 所示，试验期间，两种养殖模式池塘水体综合营养指数均呈先上升后下降趋势，

对照塘综合营养指数由初始 67.98% 升高到 71.14%，上升幅度为 3.16%，循环塘综合营养指数由 60.61% 升高到 61.65%，上升幅度为 1.04%，表明循环塘综合营养指数的上升幅度低于对照塘。而综合营养指数是水体富营养化状态的数据表征，由此说明循环塘的水体富营养化趋势受到了抑制，此结果与林少华等<sup>[24]</sup>循环水池塘养殖系统具有良好的自我氮磷污染削减功能的研究结果相一致。

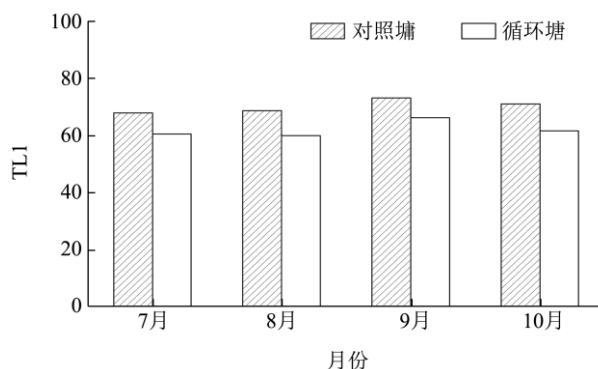


图 2 池塘综合营养状态指数动态

Fig.2 Comprehensive nutrition state index dynamic of pond

表 1 两种模式池塘水质评价及污染等级

Table 1 Water quality of pond under different culture modes

项目	组别	TAN	NH <sub>3</sub> -N	NO <sup>2</sup> -N	NO <sup>3</sup> -N	TN	TP	DO
超标率/%	对照塘	41.18	64.71	70.59	64.71	100	100	88.24
	循环塘	23.53	41.18	11.76	64.71	100	88.24	47.06
超标倍数	对照塘	/	0.50	1.00	0.55	2.28	0.75	0.20
	循环塘	/	/	/	0.13	1.54	0.65	0.03
平均值/(mg/L)	对照塘	0.91	0.03	0.30	1.55	3.28	0.35	4.00
	循环塘	0.72	0.02	0.10	1.13	2.54	0.33	4.85
单项污染指数P <sub>i</sub>	对照塘	0.91	1.88	2.51	1.95	3.58	2.22	1.48
	循环塘	0.72	1.00	0.67	1.27	3.02	2.09	1.07
负荷比Q	对照塘	6.26	12.94	17.27	13.42	24.64	15.28	10.19
	循环塘	7.32	10.16	6.81	12.91	30.69	21.24	10.87
综合污染指数P <sub>j</sub>	对照塘	2.93						
	循环塘	2.36						

表 2 池塘水质营养状态指数计算

Table 2 Trophic status index in the pond

月份	TLI (Chl <i>a</i> )		TLI (SD)		TLI (TN)		TLI (TP)	
	对照塘	循环塘	对照塘	循环塘	对照塘	循环塘	对照塘	循环塘
7月	58.59	60.13	81.29	77.34	67.72	65.87	77.94	73.91
8月	59.90	59.06	78.43	76.47	75.34	71.66	79.79	79.23
9月	68.06	65.78	78.88	75.87	78.10	71.98	77.74	77.36
10月	64.81	60.99	80.04	76.86	75.28	70.49	73.33	72.39

## 2.2 不同养殖模式下黄颡鱼形体指数差异

鱼类的形体指数是评价商品鱼经济性状的重要指标之一<sup>[25]</sup>。两种养殖模式下黄颡鱼形体指数差异如表3所示。湿地组黄颡鱼的平均空壳率为61.14%，显著高于传统组 ( $P<0.05$ )，肥满度及脏器指数则与传统组无显著差异。说明组合湿地-池塘循环水养殖黄颡鱼的可食用肌肉占比较大，具有更高的经济价值。这可能是由于传统组池塘底部残留较多饵料及鱼体排泄物，导致池塘水中亚硝酸盐含量升高，从而造成鱼体血液中血红蛋白数量降低，进而削弱鱼类血液的载氧性能，导致其新陈代谢速度减慢，对正常生长带来影响<sup>[26]</sup>。

表3 养殖模式对黄颡鱼形体指数的影响

Table 3 Effects of different culture modes on body index of

<i>P. fulvidraco</i>			
组别	肥满度/(g/cm <sup>3</sup> )	脏器指数/%	空壳率/%
传统组	1.00±0.09 <sup>a</sup>	7.65±2.01 <sup>a</sup>	58.23±2.99 <sup>b</sup>
湿地组	0.99±0.07 <sup>a</sup>	7.72±2.51 <sup>a</sup>	61.14±3.11 <sup>a</sup>

注：同一指标中不同的字母表示有显著性差异 ( $P<0.05$ )，下表同。

## 2.3 不同养殖模式下黄颡鱼表观及质地品质差异

为解析养殖模式对黄颡鱼表观及质地品质的影响，测定了传统池塘养殖及组合湿地-池塘循环水养殖模式下黄颡鱼的色度值、全质构参数及蒸煮损失率，

表5 养殖模式对黄颡鱼全质构参数及蒸煮损失的影响

Table 5 Effects of different culture modes on texture characters and cooking loss of *P. fulvidraco*

组别	硬度/g	弹性	内聚性	咀嚼性/g	回复性	蒸煮损失率/%
传统组	4 358.97±561.34 <sup>a</sup>	0.68±0.07 <sup>a</sup>	0.60±0.03 <sup>a</sup>	1 768.58±307.97 <sup>a</sup>	0.46±0.04 <sup>a</sup>	25.02±2.81 <sup>a</sup>
湿地组	5 508.05±809.89 <sup>a</sup>	0.63±0.03 <sup>a</sup>	0.52±0.04 <sup>b</sup>	1 798.81±311.00 <sup>a</sup>	0.38±0.04 <sup>b</sup>	17.79±2.33 <sup>b</sup>

## 2.4 不同养殖模式下黄颡鱼肌肉营养品质差异

鱼类的营养品质与蛋白质及氨基酸、脂肪及脂肪酸的含量和组成等密切相关<sup>[30]</sup>。湿地组黄颡鱼水分含量以及粗蛋白含量显著高于传统组黄颡鱼 ( $P<0.05$ ) (表6)，吕敏等<sup>[10]</sup>研究发现稻田养殖黄颡鱼的粗蛋白含量同样显著高于池塘养殖，这可能与养殖环境及鱼体的运动有关。湿地组黄颡鱼肌肉中粗灰分含量为0.72 g/100 g，显著低于传统组黄颡鱼 ( $P<0.05$ ) 而两种养殖模式下黄颡鱼肌肉粗脂肪含量无显著差异。

湿地组黄颡鱼肌肉的各必需氨基酸含量均显著高于传统组 ( $P<0.05$ ) (表7)，这可能是由于一定程度的运动加速了黄颡鱼肌肉蛋白质的合成和转化效率<sup>[31]</sup>。

其结果如表4、表5所示。

与传统组相比，湿地组黄颡鱼亮度值及白度值均有显著提升 ( $P<0.05$ ) (表2)，说明湿地组黄颡鱼肉质色泽更优。更高白度及亮度的肌肉有利于提高消费者购买率，进而提升湿地组黄颡鱼经济价值。鱼肉的质构是其组织特性品质的关键指标之一<sup>[27]</sup>。两种养殖模式下黄颡鱼肌肉的弹性及咀嚼性无显著差异 (表3)，湿地组黄颡鱼的内聚性及回复性均显著低于传统组黄颡鱼 ( $P<0.05$ )。湿地组黄颡鱼肌肉硬度 (5 508.05 g) 略高于传统组 (4 358.97 g)，可能是由于湿地组养殖环境更接近于自然水域环境，使得其运动能力提高从而改变了肌肉纤维的状态，提高了硬度。Li 等<sup>[28]</sup>研究发现持续运动使得清波鱼肌纤维直径减少、密度增加。

蒸煮损失是衡量鱼肉品质的另一重要指标<sup>[29]</sup>。蒸煮损失率低证明肌肉的水分流失少，鱼肉持水性更高。湿地组黄颡鱼平均蒸煮损失率 (17.79%) 显著低于传统组 (25.02%) ( $P<0.05$ )，即湿地组黄颡鱼肉质更为紧实，水分流失少。以上研究结果表明组合湿地-池塘循环水养殖黄颡鱼肌肉表观及质地品质综合表现更优，商品经济价值更高。

表4 养殖模式对黄颡鱼色度差异的影响

Table 4 Effects of different culture modes on colour of

<i>P. fulvidraco</i>				
组别	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$W$
传统组	52.43±1.78 <sup>b</sup>	3.28±0.86 <sup>a</sup>	6.14±0.64 <sup>a</sup>	51.91±1.74 <sup>b</sup>
湿地组	56.60±2.61 <sup>a</sup>	3.68±0.54 <sup>a</sup>	6.62±0.64 <sup>a</sup>	55.93±2.51 <sup>a</sup>

湿地组黄颡鱼的EAA/TAA值为40.40%，EAA/NEAA值为78.67%，均高于传统组，该结果与刘梅等<sup>[8]</sup>池塘内循环水养殖黄颡鱼的必需氨基酸总量及必需氨基酸指数显著高于常规池塘组的研究结果一致。组合湿地-池塘循环水养殖黄颡鱼符合FAO/WHO推荐的理想蛋白模式<sup>[32]</sup>，表明其肌肉的必需氨基酸种类齐全且比例适宜，更利于人体吸收。

表6 不同养殖模式下黄颡鱼肌肉常规营养成分含量 (g/100 g)

Table 6 Content of nutritional components in *P. fulvidraco* muscle at different culture modes

组别	水分	粗灰分	粗蛋白	粗脂肪
传统组	71.95±0.86 <sup>b</sup>	0.90±0.10 <sup>a</sup>	16.89±0.07 <sup>b</sup>	2.52±0.27 <sup>a</sup>
湿地组	75.69±0.63 <sup>a</sup>	0.72±0.04 <sup>b</sup>	18.68±0.10 <sup>a</sup>	3.14±0.14 <sup>a</sup>

表7 不同养殖模式下黄颡鱼肌肉水解氨基酸含量 (mg/kg)

氨基酸	传统组	湿地组
天冬氨酸 Asp	62 417.77±559.62 <sup>b</sup>	69 937.30±423.34 <sup>a</sup>
谷氨酸 Glu	89 519.79±804.36 <sup>b</sup>	100 063.24±627.75 <sup>a</sup>
丝氨酸 Ser	22 455.40±197.23 <sup>b</sup>	25 034.68±152.61 <sup>a</sup>
甘氨酸 Gly	27 024.88±309.22 <sup>b</sup>	27 799.96±192.84 <sup>a</sup>
脯氨酸 Pro	17 147.86±219.92 <sup>b</sup>	18 249.87±99.54 <sup>a</sup>
酪氨酸 Tyr	18 105.04±169.34 <sup>b</sup>	20 439.27±139.50 <sup>a</sup>
丙氨酸 Ala	24 756.46±239.69 <sup>b</sup>	26 957.15±173.07 <sup>a</sup>
∑非必需氨基酸	261 427.19±2 498.23 <sup>b</sup>	288 481.46±1 785.09 <sup>a</sup>
组氨酸 His	11 241.49±62.07 <sup>b</sup>	12 912.53±87.49 <sup>a</sup>
精氨酸 Arg	31 255.65±329.31 <sup>b</sup>	33 435.35±175.37 <sup>a</sup>
∑半必需氨基酸	42 497.14±391.06 <sup>b</sup>	46 347.88±262.86 <sup>a</sup>
缬氨酸 Val	23 756.51±237.04 <sup>b</sup>	27 167.46±170.41 <sup>a</sup>
蛋氨酸 Met	10 034.20±96.66 <sup>b</sup>	16 310.56±107.51 <sup>a</sup>
苏氨酸 Thr	22 425.81±188.18 <sup>b</sup>	24 702.59±167.78 <sup>a</sup>
异亮氨酸 Ile	23 210.14±223.97 <sup>b</sup>	26 802.82±146.20 <sup>a</sup>
亮氨酸 Leu	42 921.24±369.70 <sup>b</sup>	48 610.11±301.74 <sup>a</sup>
苯丙氨酸 Phe	23 728.45±239.17 <sup>b</sup>	26 679.88±134.00 <sup>a</sup>
赖氨酸 Lys	50 685.67±617.77 <sup>b</sup>	56 680.67±296.72 <sup>a</sup>
∑必需氨基酸	196 762.01±1 932.19 <sup>b</sup>	226 954.09±1 249.41 <sup>a</sup>
总氨基酸含量	500 686.33±4 816.22 <sup>b</sup>	561 783.44±3 291.21 <sup>a</sup>
(EAA/TAA)/%	39.30	40.40
(EAA/NEAA)/%	75.26	78.67

湿地组黄颡鱼肌肉的总脂肪酸含量显著高于传统组黄颡鱼 ( $P<0.05$ ) (表8), 可能是由于水流增加会提高鱼体对于饲料的利用率, 从而利于鱼体内脂肪囤积, 此结果与 Li 等<sup>[31]</sup>发现的运动使得罗非鱼肌肉脂质氧化减少, 脂质百分比增加的研究结果相符。不饱和脂肪酸具有多种生物功能, 在调控脂蛋白平衡、降低胆固醇等方面有重要贡献<sup>[33,34]</sup>, Omega-3 不饱和脂肪酸功效最为显著。湿地组不饱和脂肪酸、Omega-3 脂肪酸以及 Omega-6 脂肪酸约为传统组的 3.78 倍、2.64 倍以及 3.25 倍。尤其是湿地组的  $\alpha$ -亚麻酸、EPA、DHA 分别为池塘组的 3.28 倍、2.81 倍及 2.45 倍。研究证实野生群体的水产动物体内 EPA 及 DHA 含量往往高于养殖群体<sup>[35,36]</sup>, 这主要与摄食来源、食物组成、生长环境及水中化学物质比例等有关, 但其具体机制仍有

表9 不同养殖模式黄颡鱼感官评分

Table 9 Sensory evaluation of *P. fulvidraco* at different culture models

组别	气味	滋味	色泽	质地	总体得分	总体感官描述
传统组	7.51±0.40 <sup>b</sup>	7.65±0.71 <sup>b</sup>	7.91±0.80 <sup>b</sup>	7.17±0.12 <sup>b</sup>	7.62±0.53 <sup>b</sup>	腥味淡; 较鲜美; 白、亮; 质地软弹
湿地组	8.98±0.32 <sup>a</sup>	9.29±0.90 <sup>a</sup>	8.67±0.72 <sup>a</sup>	8.28±0.30 <sup>a</sup>	8.94±0.20 <sup>a</sup>	香气较浓、无鱼腥味; 鲜美、回甘; 光泽度好; 肉质紧致

待进一步研究。

表8 不同养殖模式下黄颡鱼肌肉水解脂肪酸含量 (mg/kg)

脂肪酸	传统组	湿地组
肉豆蔻酸 C14:0	2.35±0.04 <sup>b</sup>	11.35±0.04 <sup>a</sup>
十五烷酸 C15:0	-	1.44±0.00 <sup>a</sup>
棕榈酸 C16:0	88.59±1.36 <sup>b</sup>	352.50±1.37 <sup>a</sup>
硬脂酸 C18:0	28.20±0.11 <sup>b</sup>	109.28±0.19 <sup>a</sup>
花生酸 C20:0	-	3.11±0.02 <sup>a</sup>
棕榈油酸 C16:1	7.86±0.09 <sup>b</sup>	34.49±0.34 <sup>a</sup>
油酸 C18:1n9c	151.52±1.13 <sup>b</sup>	663.44±1.61 <sup>a</sup>
二十碳烯酸 C20:1	5.70±0.22 <sup>b</sup>	24.19±0.12 <sup>a</sup>
芥酸 C22:1n9	2.84±0.02 <sup>b</sup>	3.52±0.05 <sup>a</sup>
亚油酸 C18:2n6c	101.56±1.19 <sup>b</sup>	333.69±0.50 <sup>a</sup>
$\alpha$ -亚麻酸 C18:3n3	5.43±0.13 <sup>b</sup>	17.81±0.15 <sup>a</sup>
二十碳二烯酸 C20:2	5.04±0.07 <sup>b</sup>	15.89±0.05 <sup>a</sup>
二十碳三烯酸 C20:3n3	-	2.70±0.02 <sup>a</sup>
二十碳三烯酸 C20:3n6	4.04±0.05 <sup>b</sup>	9.86±0.13 <sup>a</sup>
花生四烯酸 C20:4n6	3.04±0.04 <sup>b</sup>	6.29±0.04 <sup>a</sup>
二十碳五烯酸 C20:5n3	2.35±0.06 <sup>b</sup>	6.60±0.06 <sup>a</sup>
二十二碳六烯酸 C22:6n3	19.61±0.19 <sup>b</sup>	47.95±0.25 <sup>a</sup>
总脂肪酸含量	428.13±4.23 <sup>b</sup>	1 644.12±3.15 <sup>a</sup>
饱和脂肪酸含量	119.14±1.44 <sup>b</sup>	477.69±1.21 <sup>a</sup>
不饱和脂肪酸含量	308.98±3.01 <sup>b</sup>	1 166.43±1.95 <sup>a</sup>
∑Omega-3 脂肪酸	27.39±0.32 <sup>b</sup>	72.36±0.39 <sup>a</sup>
∑Omega-6 脂肪酸	104.60±1.24 <sup>b</sup>	339.98±0.46 <sup>a</sup>

注: “-”表示样品中未检测到该物质, 下表同。

## 2.5 不同养殖模式下黄颡鱼风味品质差异

湿地组黄颡鱼感官评价各项得分均显著高于传统组 ( $P<0.05$ ), 且二者总体感官描述存在明显区别。由表9可知, 组合湿地-池塘循环水养殖模式下的黄颡鱼感官品质更佳。

风味物质包括不挥发性物质和挥发性化合物, 游离氨基酸、游离脂肪酸、核苷酸及其降解产物是对鱼类滋味有贡献的不挥发性物质, 而醇、醛、酮等挥发性物质则被认为是对鱼类气味有重要贡献的挥发性化合物<sup>[37]</sup>。

表 10 不同养殖模式对黄颡鱼游离氨基酸含量及 TAV 值

Table 10 Content of free amino acids and TAV in *P. fulvidraco* at different culture models

游离氨基酸	呈味特征 <sup>[42]</sup>	阈值/(mg/kg)	传统组/(mg/kg)	TAV 值	湿地组/(mg/kg)	TAV 值
天冬氨酸 Asp	鲜/酸	1 000	274.90±2.57 <sup>a</sup>	0.27	167.40±2.59 <sup>b</sup>	0.17
谷氨酸 Glu	鲜/酸	300	990.98±8.72 <sup>a</sup>	3.30	659.93±12.10 <sup>b</sup>	2.20
丝氨酸 Ser	甜	1 500	114.69±0.35 <sup>a</sup>	0.07	81.49±2.44 <sup>b</sup>	0.05
甘氨酸 Gly	甜	1 300	1 871.39±15.40 <sup>b</sup>	1.44	2 183.40±52.50 <sup>a</sup>	1.68
组氨酸 His	苦/酸	200	318.88±5.62 <sup>a</sup>	1.59	52.80±3.46 <sup>b</sup>	0.26
精氨酸 Arg	苦/甜	500	196.24±1.66 <sup>a</sup>	0.39	83.30±2.33 <sup>b</sup>	0.17
苏氨酸 Thr	甜	2 600	157.24±11.12 <sup>a</sup>	0.06	129.99±3.49 <sup>a</sup>	0.05
丙氨酸 Ala	甜	600	1 524.12±15.55 <sup>a</sup>	2.54	1 525.87±26.88 <sup>a</sup>	2.54
脯氨酸 Pro	甜	3 000	58.86±0.20 <sup>b</sup>	0.02	74.85±0.38 <sup>a</sup>	0.02
酪氨酸 Tyr	苦	-	125.33±1.59 <sup>b</sup>	-	217.01±5.79 <sup>a</sup>	-
缬氨酸 Val	苦	400	696.36±6.10 <sup>a</sup>	1.74	647.55±11.11 <sup>b</sup>	1.62
蛋氨酸 Met	苦	300	630.50±5.87 <sup>b</sup>	2.10	698.05±11.55 <sup>a</sup>	2.33
异亮氨酸 Ile	苦	900	321.12±3.40 <sup>a</sup>	0.36	325.07±8.35 <sup>a</sup>	0.36
亮氨酸 Leu	苦	1 900	632.51±9.48 <sup>a</sup>	0.33	667.09±7.22 <sup>a</sup>	0.35
苯丙氨酸 Phe	苦	900	376.38±4.76 <sup>b</sup>	0.42	464.25±12.62 <sup>a</sup>	0.56
赖氨酸 Lys	苦	500	1 435.10±9.96 <sup>a</sup>	2.87	709.23±3.46 <sup>b</sup>	1.42
总氨基酸含量			9 724.60±98.26 <sup>a</sup>		8 687.29±139.44 <sup>b</sup>	
∑鲜味氨基酸			1 265.88±11.29 <sup>a</sup>		827.33±14.69 <sup>b</sup>	
∑甜味氨基酸			5 161.39±52.18 <sup>a</sup>		4 704.83±89.15 <sup>b</sup>	
∑苦味氨基酸			3 297.33±34.79 <sup>a</sup>		3 155.12±35.60 <sup>a</sup>	
∑酸味氨基酸			1 584.76±16.92 <sup>a</sup>		880.13±11.23 <sup>b</sup>	
鲜甜味氨基酸比值			0.57		0.58	
苦酸味氨基酸比值			0.43		0.42	

表 11 不同养殖模式黄颡鱼游离脂肪酸含量 (mg/kg)

Table 11 Content of free fat acids in *P. fulvidraco* at different culture models

游离脂肪酸	传统组	湿地组	游离脂肪酸	传统组	湿地组
肉豆蔻酸 C14:0	2.09±0.03 <sup>b</sup>	3.21±0.00 <sup>a</sup>	二十碳二烯酸 C20:2	3.94±0.08 <sup>b</sup>	5.24±0.20 <sup>a</sup>
棕榈酸 C16:0	57.27±6.33 <sup>a</sup>	98.79±17.31 <sup>a</sup>	二十碳三烯酸 C20:3n6	3.07±0.05 <sup>b</sup>	3.64±0.09 <sup>a</sup>
硬脂酸 C18:0	15.33±0.25 <sup>b</sup>	24.91±0.67 <sup>a</sup>	花生四烯酸 C20:4n6	0.64±0.91 <sup>b</sup>	0.68±0.96 <sup>a</sup>
棕榈油酸 C16:1	7.58±0.03 <sup>b</sup>	11.64±0.06 <sup>a</sup>	二十碳五烯酸 C20:5n3	1.62±0.03 <sup>b</sup>	2.04±0.09 <sup>a</sup>
油酸 C18:1n9c	130.29±0.68 <sup>b</sup>	220.32±7.68 <sup>a</sup>	二十二碳六烯酸 C22:6n3	9.75±0.03 <sup>b</sup>	9.83±0.29 <sup>a</sup>
二十碳烯酸 C20:1	4.60±0.30 <sup>b</sup>	6.79±0.06 <sup>a</sup>	总脂肪酸含量	345.45±6.45 <sup>b</sup>	541.28±5.03 <sup>a</sup>
芥酸 C22:1n9	2.89±0.05 <sup>a</sup>	2.98±0.03 <sup>a</sup>	饱和脂肪酸含量	74.69±6.05 <sup>a</sup>	126.90±16.64 <sup>a</sup>
亚油酸 C18:2n6c	99.43±0.35 <sup>b</sup>	140.46±4.28 <sup>a</sup>	不饱和脂肪酸含量	270.77±0.40 <sup>b</sup>	414.38±11.61 <sup>a</sup>
α-亚麻酸 C18:3n3	6.97±0.08 <sup>b</sup>	10.76±0.03 <sup>a</sup>			

通过测定黄颡鱼背部肌肉游离氨基酸、游离脂肪酸、核苷酸及其降解产物含量对两种养殖模式下黄颡鱼肌肉滋味品质进行表征,结果如表 10~12 所示。

传统组黄颡鱼总游离氨基酸含量及各呈味游离氨基酸总含量显著高于湿地组 ( $P<0.05$ ) (表 10)。游离氨基酸对滋味的贡献程度可以用味道强度值 (TAV) 来表示<sup>[38]</sup>。TAV>1 时,说明该呈味物质对产品的滋

味有显著影响,且 TAV 数值越大,表明其对滋味贡献越大。传统组黄颡鱼肌肉中谷氨酸、甘氨酸、组氨酸、丙氨酸、缬氨酸、蛋氨酸及赖氨酸的 TAV 均大于 1,而湿地组中呈现苦/酸味的组氨酸 TAV 小于 1,同时呈甜味的甘氨酸 TAV 增大、呈苦味的缬氨酸及赖氨酸 TAV 减小,这与苦酸味及鲜甜味氨基酸占比趋势一致,即相较于传统组,湿地组黄颡鱼肌肉苦酸味减弱,滋



味更为甘甜。此外，湿地组黄颡鱼总游离脂肪酸含量是传统组的 1.57 倍（表 11），更高的游离脂肪酸含量使得湿地组黄颡鱼风味更为丰富，这主要是由于多数风味化合物可溶于脂类<sup>[39]</sup>，酯类可作为气味化合物在食品中迁移的载体，同时游离脂肪酸可以通过化学感觉机制促进人体对味道的感知，增强风味品质的醇厚感<sup>[40]</sup>。同时，湿地组黄颡鱼肌肉中呈鲜味的 IMP 含量显著高于传统组（ $P < 0.05$ ），是传统组的 3.16 倍（表 12），而传统组黄颡鱼肌肉中呈苦味的 HxR 和 Hx 含量分别为湿地组的 1.20 倍和 1.21 倍。由上可知，组合湿地-池塘循环水养殖黄颡鱼的肉质鲜甜味更显著，苦酸味更低，滋味品质更优，这与感官评价及马旭洲等<sup>[37]</sup>对于瓦式黄颡鱼肌肉含脂量高，风味物质含量较高，口感更佳的研究结果一致。

通过 SPME-GC-MS 测定黄颡鱼背部肌肉挥发性风味成分以表征两种养殖模式下黄颡鱼肌肉风味品质，共检测出约 30 余种物质，在此仅列举对风味贡献较大的醛类、醇类、酮类，具体结果如表 13 所示。挥发性化合物对风味的贡献程度可用相对气味活度值

(ROAV) 来表示，当  $ROAV \geq 1$  时说明该化合物为样品的关键气味物质<sup>[41]</sup>。相较于传统组，湿地组黄颡鱼未检测出具有油脂味的 1-十二醛，且呈青草味、油脂味的己醛、壬醛以及(E)-2-辛烯-1-醇含量较低，而呈柠檬味、柑橘味的庚醛、辛醛含量较高，说明湿地组黄颡鱼的气味品质较好，与感官评价结果相一致。

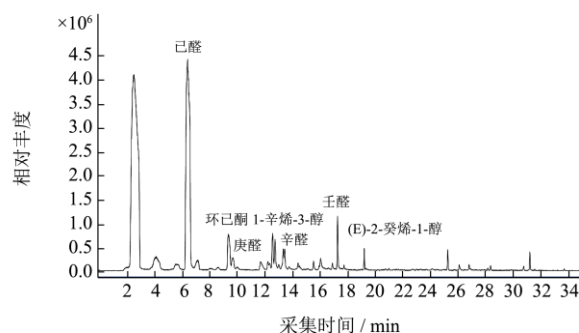


图 3 传统池塘养殖黄颡鱼挥发性气味化合物总离子流图  
Fig.3 Total ion chromatogram of volatile odor compound of *P. fulvidraco* cultured in conventional pond

表 12 不同养殖模式对黄颡鱼核苷酸含量

Table 12 Content of nucleotides in *P. fulvidraco* at different culture models

核苷酸	呈味特性 <sup>[21]</sup>	阈值/(mg/kg)	传统组		湿地组	
			含量/(mg/kg)	TAV	含量/(mg/kg)	TAV
5'-三磷酸腺苷 ATP	鲜	-	136.97±1.05 <sup>a</sup>	-	135.87±0.27 <sup>a</sup>	-
5'-二磷酸腺苷 ADP	-	-	31.32±12.88 <sup>a</sup>	-	16.32±0.01 <sup>b</sup>	-
5'-一磷酸腺苷 AMP	鲜	500	11.95±0.07 <sup>a</sup>	0.02	11.93±0.22 <sup>a</sup>	0.02
5'-次黄嘌呤核苷酸 IMP	鲜	250	57.09±1.23 <sup>b</sup>	0.23	180.28±5.86 <sup>a</sup>	0.72
鸟嘌呤核苷酸 GMP	鲜/甜	125	12.30±0.08 <sup>a</sup>	0.10	12.28±0.01 <sup>a</sup>	0.10
次黄嘌呤核苷 HxR	苦	-	76.77±2.18 <sup>a</sup>	-	63.72±3.04 <sup>b</sup>	-
次黄嘌呤 Hx	苦	-	57.37±0.44 <sup>a</sup>	-	47.29±2.14 <sup>b</sup>	-

表 13 不同养殖模式对黄颡鱼主要挥发性风味化合物相对含量

Table 13 Relative content of major volatile flavor compounds in *P. fulvidraco* from different culture models

化合物种类	挥发性风味物质	保留时间/min	气味 <sup>[21]</sup>	阈值/(μg/kg)	传统组		湿地组	
					含量/(μg/kg)	ROAV	含量/(μg/kg)	ROAV
醛类	己醛	6.61	青草味	4.50	3 823.32±673.88 <sup>a</sup>	100.00	3 693.02±658.15 <sup>a</sup>	100.00
	庚醛	9.84	柠檬味	3.00	159.70±30.62 <sup>a</sup>	6.27	185.21±16.50 <sup>a</sup>	7.52
	辛醛	13.59	柑橘味	13.00	130.91±28.41 <sup>a</sup>	1.19	145.62±9.55 <sup>a</sup>	1.36
	壬醛	17.41	油脂味	1.00	263.52±11.15 <sup>a</sup>	31.02	212.91±39.92 <sup>a</sup>	25.94
	1-十二醛	23.42	油脂味	0.50	37.76±2.94 <sup>a</sup>	8.89	-	-
醇类	1-庚醇	17.40	油脂味	-	713.76±42.94 <sup>a</sup>	-	679.76±27.41 <sup>b</sup>	-
	(E)-2-癸烯-1-醇	21.11	油脂味	-	37.41±3.47 <sup>a</sup>	-	29.37±7.21 <sup>a</sup>	-
	1-辛烯-3-醇	12.73	蘑菇味	10.00	265.47±34.12 <sup>a</sup>	3.12	263.64±14.00 <sup>a</sup>	3.21
酮类	2,3-戊二酮	4.43	焦糖味	30.00	203.27±22.12 <sup>a</sup>	0.80	237.07±21.15 <sup>a</sup>	0.96
	2,3-辛二酮	12.91	过熟味	-	565.17±18.43 <sup>a</sup>	-	373.44±27.23 <sup>b</sup>	-

注：在两种养殖模式下，己醛均具有最高的 OAV，故取其为 100 以计算其他物质的 ROAV。

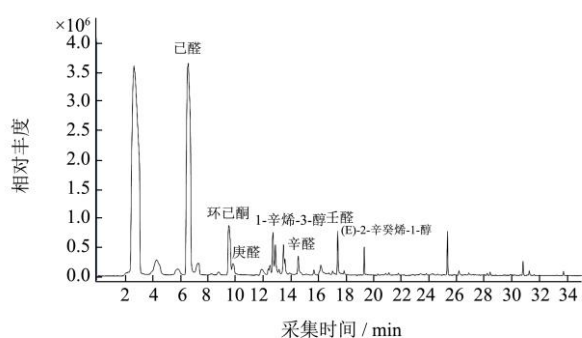


图4 组合湿地-池塘循环水养殖黄颡鱼挥发性气味化合物总离子流图

Fig.4 Total ion chromatogram of volatile odor compound of *P. fulvidraco* cultured in combined wetland-pond circulating water

### 3 结论

相较于传统池塘水质,组合湿地-循环水池塘污染程度较轻,水体富营养化趋势受到抑制,水环境更有利于黄颡鱼的品质提升。与传统池塘养殖相比,组合湿地-池塘循环水养殖黄颡鱼具有更高的可食用肉占比、更优的表观及质地特性,必需氨基酸含量高且水解氨基酸的组成更符合FAO/WTO推荐的理想蛋白模式,同时鲜甜味氨基酸占比多、苦酸味氨基酸占比少,IMP的含量及TAV更高,Hx及HxR含量更低,且具有鱼腥味、油脂味等异味的挥发性气味物质含量更低,呈柠檬味、柑橘味等怡人气味的挥发性气味物质含量更高,肉质的风味品质更优。通过组合湿地-池塘循环水养殖模式,黄颡鱼肌肉品质得到提升。本研究为探究不同养殖模式下黄颡鱼品质差异、选取合适的养殖模式以提升黄颡鱼品质等提供理论依据。

### 参考文献

- [1] 郑珂珂,朱晓鸣,韩冬,等.饲料脂肪水平对瓦氏黄颡鱼生长及脂蛋白脂酶基因表达的影响[J].水生生物学报,2010,34(4):815-821.
- [2] 农业农村部渔业渔政管理局,全国水产技术推广总站,中国水产学会.2021中国渔业统计年鉴[J].中国水产,2021:47-48.
- [3] ZHANG Jiajia, PEI Xueying, WU Zhaowen, et al. A comparative study of immune response between hybrid yellow catfish "Huangyou-1" and its parental populations after challenge with *Aeromonas hydrophila* or *Edwardsiella ictaluri* [J]. Aquaculture International, 2019, 27(3): 859-873.
- [4] LIU Xingguo, SHAO Zhengyi, CHENG Guofeng, et al. Ecological engineering in pond aquaculture: a review from the whole-process perspective in China [J]. Reviews in Aquaculture, 2020, 13(2): 1060-1076.
- [5] Owatar, Marco, Shizuo, et al. Synthetic fibre as biological support in freshwater recirculating aquaculture systems (RAS) [J]. Aquacultural Engineering, 2018, 82: 56-62.
- [6] 刘栋,张成龙,朱健.池塘循环水养殖系统构建及其生态净化效果研究进展[J].中国农学通报,2018,34(17):145-152.
- [7] Grigorakisk riton. Compositional and organoleptic quality of farmed and wild gilthead sea bream (*Sparus aurata*) and sea bass (*Dicentrarchus labrax*) and factors affecting it: A review [J]. Aquaculture, 2007, 272(1-4): 55-75.
- [8] 刘梅,宓国强,郭建林,等.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,2019,31(4):1704-1717.
- [9] 韩庆,马欣欣,黄春红.洞庭湖黄颡鱼肌肉营养成分及品质特性分析[J].食品安全质量检测学报,2021,12(23):9102-9108.
- [10] 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.
- [11] 陶冶,朱健,李冰,等.基于氮、磷收支的人工湿地-池塘循环水养殖系统净化效果评价[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2021,51(2):36-45.
- [12] Bartelme Ryan, Smth Matthew, Sepulvedavileto svaldo, et al. Component microenvironments and system biogeography structure microorganism distributions in recirculating aquaculture and aquaponic systems [J]. Msphere, 2019, 4(4): e00143-19.
- [13] 孙瑞萌.模块化组合湿地设计构建与应用研究[D].上海:上海海洋大学,2021.
- [14] Mohd F, Hon J, Sharifah R. Dietary protein level influenced reproductive development of hoven's carp *Leptobarbus hoevenii* female broodstock [J]. Animal Feed Science and Technology, 2021, 281: 115112.
- [15] LIU Qian, KONG Baohua, HAN Jianchun, et al. Effects of superchilling and cryoprotectants on the quality of common carp (*Cyprinus carpio*) surimi: microbial growth, oxidation, and physicochemical properties [J]. LWT - Food Science and Technology, 2014, 57(1): 165-171.
- [16] 陈东清.草鱼片调理处理及其贮藏过程中的品质变化研究[D].武汉:华中农业大学,2015.
- [17] 刘云轩.紫苏提取物的特性及对调理鱼片品质的影响[D].武汉:华中农业大学,2016.
- [18] YANG Zhen, WANG Wei, WANG Haiyan, et al. Effects of a highly resistant rice starch and pre-incubation temperatures on the physicochemical properties of surimi gel from grass carp (*Ctenopharynxodon idellus*) [J]. Food Chemistry, 2014,

- 145: 212-219.
- [19] Gheshlaghi R, Scharer J, Mooyoung M, et al. Application of statistical design for the optimization of amino acid separation by reverse-phase HPLC [J]. *Analytical Biochemistry*, 2008, 383(1): 93-102.
- [20] 刘敬科. 鲢鱼风味特征及热历史对鲢鱼风味的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
- [21] LUO Xiaoying, XIAO Shuting, RUAN Qiufeng, et al. Differences in flavor characteristics of frozen surimi products reheated by microwave, water boiling, steaming, and frying [J]. *Food Chemistry*, 2022, 372: 131260.
- [22] 杨姣, 安玥琦, 陈雨欣, 等. 鱼糜制品加热过程中过熟味的特征风味成分解析[J]. *现代食品科技*, 2020, 36(8): 265-280.
- [23] 陈周, 胡杨, 安玥琦, 等. 短时间微流水处理对池塘养殖草鱼鱼肉品质的提升作用[J]. *水产学报*, 2020, 44(7): 1198-1210.
- [24] 林少华, 周翔, 周婷婷, 等. 大型循环水池塘养殖系统氮磷污染控制绩效评估[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(10): 5535-5541.
- [25] 黄爱霞, 陈建明, 姜建湖, 等. 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*, 2021, 5: 73-74.
- [26] 唐黎标. 水质对水产养殖的影响和对策[J]. *渔业致富指南*, 2017, 18: 36-37.
- [27] YANG Fang, JING Diantao, DIAO Yudian, et al. Effect of immersion freezing with edible solution on freezing efficiency and physical properties of obscure pufferfish (*Takifugu obscurus*) fillets [J]. *LWT - Food Science and Technology*, 2020, 118: 108762.
- [28] LI Xiuming, YUAN Jianming, FU Shijian, et al. The effect of sustained swimming exercise on the growth performance, muscle cellularity and flesh quality of juvenile qingbo (*Spinibarbus sinensis*) [J]. *Aquaculture*, 2016, 465: 287-295.
- [29] 吴炳存, 尚珊, 傅宝尚, 等. 热处理对红鳍东方鲀鱼肉嫩化效果的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(21): 202-209.
- [30] 管玲玲, 刘小红, 田海宁, 等. 不同养殖模式下三倍体虹鳟鱼肉品质差异的研究[J]. *水生生物学报*, 2022, 46(7): 1016-1028.
- [31] LI Dan, WEI Xueli, LIN Xiaotao, et al. Effects of exercise training on carbohydrate and lipid catabolism in the swimming muscles of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) [J]. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 2015, 99(5): 893-898.
- [32] Beaton G, Durnin J, Gopalan G. Energy and Protein Requirements [R]. Report of a Joint Expert Consultation. Geneva: World Health Organization, 1975.
- [33] CHANG Fangzhi, WANG Qing, ZHANG Qian, et al. Omega-3 polyunsaturated fatty acid inhibits the malignant progression of hepatocarcinoma by inhibiting the Wnt/beta-catenin pathway [J]. *European Review for Medical and Pharmacological Sciences*, 2018, 22(14): 4500-4508.
- [34] ZHU Xueliang, BI Zhichao, YANG Chen, et al. Effects of different doses of omega-3 polyunsaturated fatty acids on gut microbiota and immunity [J]. *Food & Nutrition Research*, 2021, 65: 6203.
- [35] 王琨, 程宝晶, 刘斌, 等. 不同年龄野生和养殖兴凯湖翘嘴鲌肌肉营养成分分析[J]. *中国水产科学*, 2012, 19(5): 906-912.
- [36] 程汉良, 蒋飞, 彭永兴, 等. 野生与养殖草鱼肌肉营养成分比较分析[J]. *食品科学*, 2013, 34(13): 266-270.
- [37] 马旭洲, 温旭, 王武. 野生与人工养殖瓦氏黄颡鱼肌肉营养成分及品质评价[J]. *安徽农业大学学报*, 2016, 43(1): 26-31.
- [38] YANG Wenxian, SGI Wenzheng, QU Yinhong, et al. Research on quality changes of grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) during short-term starvation [J]. *Food Science & Nutrition*, 2020, 8(2): 1150-1161.
- [39] YANG Ping, LIU Chen, SONG Huanlu, et al. Sensory-directed flavor analysis of off-flavor compounds in infant formula with deeply hydrolyzed milk protein and their possible sources [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 119: 108861.
- [40] Jacobsen C, Nielsen H, Jørgensen B, et al. Chemical processes responsible for quality deterioration in fish [J]. *Chemical Deterioration and Physical Instability of Food and Beverages*, 2010, 47(4): 439-465.
- [41] ZHU Yifan, CHEN Jing, CHEN Xingjie, et al. Use of relative odor activity value (ROAV) to link aroma profiles to volatile compounds: application to fresh and dried eel (*Muraenesox cinereus*) [J]. *International Journal of Food Properties*, 2020, 23(1): 2257-2270.
- [42] DONG Meng, ZHANG Yuying, HUANG Xuhui, et al. Dynamic sensations of fresh and roasted salmon (*Salmo salar*) during chewing [J]. *Food Chemistry*, 2022, 368(22): 130844.