Gao J K, Chen W, Liu H K, *et al*. Dietary extrusion temperature on growth performance, nutrient digestibility, waste discharge, and gastrointestinal microbiota of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2025, 49(12): 122514. [高建坤, 陈雯, 刘昊昆, 等. 饲料膨化加工温度对大口黑鲈生长性能、营养物质消化率、废物排放及消化道微生物的影响 [J]. 水生生物学报, 2025, 49(12): 122514.]

# 饲料膨化加工温度对大口黑鲈生长性能、营养物质消化率、废物排放及消化道微生物的影响

高建坤[1,2] 陈 雯[2] 刘昊昆[2] 金俊琰[2] 韩 冬[2,3,4] 杨云霞[2] 朱晓鸣[2] 杨 勇[5]
李大鹏[1] 解绶启[2,3,4] 张志敏[2]

(1. 华中农业大学水产学院, 武汉 430070; 2. 中国科学院水生生物研究所水产品种创制与高效养殖全国重点实验室, 武汉 430072; 3. 湖北洪山实验室, 武汉 430070; 4. 湖北省水产动物营养与饲料工程技术研究中心, 武汉 430072; 5. 广州市联鲲生物科技有限公司, 广州 511483)

**摘要:** 为探究饲料膨化温度对大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)生长性能、营养物质消化率、废物排放及消化道微生物的影响, 研究设计了两种三段式升温程序(100℃、120℃、120℃和100℃、120℃、140℃)加工的等氮(48%)等脂(9%)膨化饲料(D1和D2), 在室内循环水养殖系统中投喂初始体重为27.7 g的大口黑鲈63d。结果显示, 与D1组相比, D2组大口黑鲈的终末体重、增重率、特定生长率均显著提高, 而饲料系数显著降低($P$<0.05)。D2组的脏体比显著高于D1组, 而肝体比显著更低($P$<0.05)。与D1组相比, D2组饲料的碳和磷保留效率均显著提高($P$<0.05), 且蛋白质表观消化率显著增加($P$<0.05), 而磷表观消化率无显著差异($P$>0.05)。两组大口黑鲈全鱼与粪便的碳、氮和磷含量均无显著差异($P$>0.05), 但D2组碳、氮和磷的养殖排放量均显著低于D1组($P$<0.05)。大口黑鲈胃部和肠道菌群显著不同($P$<0.05), 而不同膨化温度饲料对大口黑鲈胃部和肠道菌群的α多样性指数和群落结构均无显著影响($P$>0.05)。上述结果表明, 适当提高饲料膨化温度有助于促进大口黑鲈生长性能和营养物质利用效率, 同时维持消化道菌群稳态, 还可降低养殖废物排放。

**关键词:** 膨化饲料; 生长性能; 废物排放; 消化道微生物; 大口黑鲈

**中图分类号:** S963.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3207(2025)12-122514-09

doi: 10.3724/1000-3207.2025.2025.0231 CSTR: 32229.14.SSSWXB.2025.0231

水产养殖业的快速发展很大程度依赖于饲料业的不断发展和技术突破。当前, 水产养殖的人工配合饲料主要有硬颗粒饲料和膨化饲料两种类型。在集约化养殖模式下, 饲料成本通常占据养殖总成本的70%以上[1]。膨化饲料因其在水中有优良的稳定性、可调控的浮沉性, 及其饲料系数和水质污染降低等特点[2], 在现代水产养殖中得到了广泛应用[3], 挤压膨化法也逐渐成为水产饲料的主要生产方法之一[4]。膨化工艺包括原料混合、调质、挤压膨化和干燥等环节[5], 其中挤压膨化阶段的加工温度是决定饲料物理特性、营养保持及其浮沉性的关键控制因素[6]。挤压过程的饲料加工温度也可能对鱼的生长速度、饲料转化效率和鱼类营养品质产生影响[7]。与硬颗粒饲料相比, 膨化饲料是经过高温、高压使原料的温度升高至100℃以上, 而膨胀挤出的饲料[5]。Gao等[8]通过研究发现, 对异育银鲫中科5号(*Carassius gibelio* var. CAS V)分别投喂膨化饲料和颗粒饲料, 相同粒径时投喂膨化饲料

**收稿日期:** 2025-07-06; **修订日期:** 2025-08-14

**基金项目:** 国家重点研发计划(2024YFE0105900); 国家自然科学基金(31902391); 湖南省重点研发计划(2024WK2015)资助 [Supported by the National Key R & D Program of China (2024YFE0105900); the National Natural Science Foundation of China (31902391); Key Research and Development Program of Hunan Province(2024WK2015)]

**作者简介:** 高建坤(2001—), 男, 硕士研究生; 主要从事鱼类营养与饲料学研究。E-mail: 16696734236@163.com

**通信作者:** 张志敏(1987—), 男, 博士; E-mail: zhangzm@ihb.ac.cn

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

显著提高了异育银鲫中科5号的生长性能和饲料利用率。适宜的膨化温度有助于饲料中蛋白质变性与淀粉糊化, 提高饲料的适口性和营养物质消化率, 从而提高水产动物的生长性能和饲料效率[9]。在水产动物养殖过程中, 未被吸收的营养物质最终以粪便或代谢废物的形式排放到水体中, 而养殖废物中氮磷是造成水体富营养化和环境恶化的主要因素[10]。因此, 优化饲料加工参数(如膨化温度)以提高饲料利用, 是减少水产养殖污染、实现水产养殖减排的重要途径[11]。此外, Wan等[12]通过研究发现投喂膨化饲料提高了克氏原螯虾(*Procambarus clarkii*)肠道内有益微生物的丰富度, 但是膨化加工温度对鱼类肠道健康的研究较少, 亟需进一步探索。

大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)俗称加州鲈, 是我国重要的养殖经济鱼类, 具有生长快、适应性强、肉质优等优点[13], 2023年全国鲈产量达88.8万吨[14]。现有对鲈饲料的相关研究多集中于蛋白源替代[15—18]或功能性添加剂筛选[19, 20]; 而饲料加工工艺对鲈生长性能、肠道健康和代谢废物(如氮、磷)排放的影响尚不明确。因此, 本研究以大口黑鲈为实验对象, 通过对比不同膨化温度饲料对其生长指标、消化道菌群结构、营养物质的表观消化率及氮、磷等养殖废物排放量的影响, 旨在为优化水产饲料加工工艺、提高养殖效益并降低环境负荷提供科学依据, 从而推动水产养殖业的可持续发展。

## 1　材料与方法

### 1.1　实验设置

实验以鱼粉和豆粕为蛋白质来源, 设计了两种三段式升温程序(100℃、120℃、120℃和100℃、120℃、140℃)配制成两种等氮等脂(粗蛋白48%、粗脂肪9%)实验饲料(D1和D2), 饲料中添加三氧化二钇作为指示剂, 用于消化率的测定。饲料配方及饲料营养组成见表 1。鱼粉来源于美国西雅图海鲜公司, 豆粕由青岛渤海农业发展有限公司提供, 维生素、矿物质预混料来源于北京英惠尔生物技术有限公司, 其余成分从当地饲料制造商获得。

### 1.2　实验饲料和养殖管理

所有原料均经过超微粉碎机粉碎后通过混合机将原料充分混合, 加入27%—28%的水进一步混合。将混合的饲料分两批, 以40—50 kg/h的恒定通量操作, 使用来自中国山东济南鼎润机械有限公司的双螺杆膨化机挤压膨化。挤出的饲料在65℃的烘箱中干燥, 并包装在塑料袋中, 储存在4℃冷库中备用。

养殖实验在中国科学研究院水生生物研究所

**表 1　实验饲料配方、近似化学成分和氨基酸组成(%干物质)**

Tab. 1　Formulation, proximate chemical composition, and amino acid profile of trial diets (% dry matter)

| 原料Ingredient (%) | 实验饲料Diet | |
|---|---|---|
| | D1 | D2 |
| 白鱼粉White fishmeal | 64 | |
| 豆粕Soybean meal | 10 | |
| 鱼油Fish oil | 2 | |
| 木薯淀粉Cassava starch | 12 | |
| 面粉Flour | 3 | |
| 磷酸二氢钙$Ca(H_2PO_4)_2$ | 1.5 | |
| 矿物质预混料Mineral premix[1] | 1 | |
| 维生素预混料Vitamin premix[2] | 1 | |
| 纤维素Cellulose | 4.4 | |
| 三氧化二钇$Y_2O_3$ | 0.1 | |
| 化学组成Proximate composition | | |
| 粗脂肪Crude fat | 9.11 | 9.06 |
| 粗蛋白Crude protein | 48.11 | 48.67 |
| 水分Moisture | 8.4 | 8.8 |
| 必需氨基酸EAA | | |
| 苏氨酸Thr | 2.07 | 2.12 |
| 缬氨酸Val | 2.49 | 2.53 |
| 蛋氨酸Met | 1.30 | 1.24 |
| 异亮氨酸Ile | 2.02 | 2.05 |
| 亮氨酸Leu | 3.63 | 3.71 |
| 苯丙氨酸Phe | 1.95 | 1.96 |
| 赖氨酸Lys | 3.60 | 3.67 |
| 组氨酸His | 0.97 | 1.00 |
| 精氨酸Arg | 3.13 | 3.19 |
| 非必需氨基酸NEAA | | |
| 天冬氨酸Asp | 4.41 | 4.48 |
| 丝氨酸Ser | 2.28 | 2.37 |
| 谷氨酸Glu | 7.26 | 7.36 |
| 甘氨酸Gly | 3.32 | 3.52 |
| 丙氨酸Ala | 2.85 | 2.94 |
| 胱氨酸Cys | 0.23 | 0.20 |
| 酪氨酸Tyr | 1.28 | 1.24 |
| 脯氨酸Pro | 1.82 | 1.99 |

注: [1]矿物质预混料(每kg预混料中): 铁, 1800 mg; 铜, 450 mg; 锌, 2000 mg; 锰, 1500 mg; 钙, 100 mg; 硒, 20 mg; 钴, 70 mg; 镁, 4000 mg。无机盐剂型(硫酸亚铁、碱式氯化铜、硫酸锌、硫酸锰、碘酸钙、亚硒酸钠、氯化钴、硫酸镁); [2]维生素预混料: 维生素A, 400000 IU; 维生素C, 15000 IU; 维生素$D_3$, 100000 IU; 维生素E, 4000 mg; 维生素$K_3$, 1440 mg; 维生素$B_1$, 800 mg; 维生素$B_2$, 800 mg; 维生素$B_6$, 800 mg; 维生素$B_{12}$, 6.0 mg; 烟酸, 5000 mg; 泛酸钙, 2800 mg; 叶酸, 380 mg; 生物素, 8.0 mg; 肌醇, 7000 mg

Note: [1]Mineral premix (contents in per kilogram premix): Fe, 1800 mg; Cu, 450 mg; Zn, 2000 mg; Mn, 1500 mg; Ca, 100 mg; Se, 20 mg; Co, 70 mg; Mg, 4000 mg. Inorganic salts ($FeSO_4$, $Cu_2(OH)_3Cl$, $ZnSO_4$, $MnSO_4$, $Ca(IO_3)_2$, $Na_2SeO_3$, $CoCl_2$, $MgSO_4$); [2]Vitamin premix: Vitamin A, 400000 IU; Vitamin C, 15000 IU; Vitamin $D_3$, 100000 IU; Vitamin E, 4000 mg; Vitamin $K_3$, 1440 mg; Vitamin $B_1$, 800 mg; Vitamin $B_2$, 800 mg; Vitamin $B_6$, 800 mg; Vitamin $B_{12}$, 6.0 mg; Nicotinic acid, 5000 mg; Calcium pantothenate, 2800 mg; Folic acid, 380 mg; Biotin, 8.0 mg; Inositol, 7000 mg

室内循环水养殖系统中进行, 实验所用的大口黑鲈购自当地渔场。将实验鱼暂养于1500 L的养殖桶中以适应环境, 用来自武汉大北农水产有限公司的商品饲料进行喂养。正式实验开始前, 将实验鱼饥饿24h, 选择健康且规格相近的120尾大口黑鲈(初始体重27.7 g), 随机分到6个养殖桶中, 每桶20尾, 每组3个重复。养殖期间的光周期为12h光照和12h黑暗, 平均水温保持约25℃, 每天两次(上午8:30和下午5:30)投喂, 记录投喂量、死鱼数量和重量, 养殖实验周期63d。每天清理粪便和置换10%—20%的水来控制水质, 确保养殖水体安全。在整个养殖期间, 养殖水体氨氮水平均小于0.14 mg/L、亚硝酸盐均小于0.16 mg/L、硝酸盐均小于6.15 mg/L。

### 1.3 样品采集

在实验开始前, 随机选取3尾大口黑鲈全鱼样品和2个饲料样品, 用于实验初始样品的基本营养组成分析和氨基酸组成测定。在生长实验结束后, 对鲈进行24h饥饿处理, 计数并称量总重。每桶随机取出3尾鱼进行全鱼基本营养组成和碳、氮、磷含量测定。从每个桶中随机取5尾鱼测量体长和体重, 用以计算肥满度(CF), 随后解剖将肝脏和内脏团取出并称重, 用以计算肝体比(HSI)和脏体比(VSI), 收集鲈背部肌肉样品进行基本营养组成分析和氨基酸组成测定。将剩下的大口黑鲈又进行3d的投喂, 在最后一餐喂食5h后, 每桶取4尾鱼进行解剖, 用于收集胃部和肠道内容物, 将每条鱼胃和后肠的内容物分别收集在1.5 mL无菌离心管中, 用液氮速冻, 后续用于消化道微生物分析。在实验过程中, 从每个鱼桶中收集粪便样品用于营养素和矿物质的表观消化率分析。所有收集的样品存放于–80℃冰箱。

### 1.4 样本分析

饲料和全鱼的基本组成测定参考AOAC[21]的方法: 饲料水分采用失重法测定, 将样品放置烘箱中105℃下烘干至恒重; 全鱼的初样和末样在高压蒸汽灭菌锅中120℃蒸30min, 随后捣碎混匀后置于75℃烘箱中烘干, 使用粉碎机粉碎成粉末状后于105℃下烘干至恒重, 基于失重法计算水分含量。采用凯氏定氮法(2300-Auto-analyzer, FOSS, Hillerød, Denmark)进行粗蛋白含量测定; 基于索氏抽提法(36680-analyzer, BUCHI, Flawil Switzerland), 使用乙醚对样品进行脂肪抽提测定。

将约0.15 g冷冻干燥后的肌肉和饲料样品置于试管中, 加入8 mL盐酸(6 mol/L)后在烘箱中消解24h (110℃); 随后对氨基酸进行衍生化处理, 然后在配备Hypersil ODS C18色谱柱(内径5 μm, 膜厚4.6 mm, 长度250 mm, Thermo, USA)的高效液相色谱仪上进行分离, 使用自动氨基酸分析仪(U-3000, Thermo, USA)对17种氨基酸进行测定。

### 1.5 指标测定

**生长性能和形体指标** 增重率、摄食率、饲料系数、特定生长率、存活率、肝体比、脏体比、肥满度计算公式:

增重率(Weight gain rate, WGR; %)=100×[终末体重(g)–初始体重(g)]/初始体重(g)

摄食率(Feeding rate, FR; %/d)=100×摄食量/[(初始体重+终末体重)/2]/天数

特定生长率(Specific growth rate, SGR; %/d)=100×(ln终末体重–ln初始体重)/天数

饲料系数(Feed conversion ratio, FCR)=摄食量(g)/[终末体重(g)–初始体重(g)]

存活率(Survival; %)=100×终末尾数/初始尾数

肝体比(Hepatopancreas index, HSI)=100×终末肝脏重(g)/终末体重(g)

脏体比(Viscerosomatic index, VSI)=100×终末内脏重(g)/终末体重(g)

肥满度(Condition factor, CF; g/cm$^3$)=100×终末体重(g)/[终末体长(cm)]$^3$

**营养物质消化率** 营养素的表观消化率计算公式:

表观消化率(Apparent digestibility coefficient, ADC; %)=100×[1–(饲料钇含量×粪便中营养物质含量)/(粪便钇含量×饲料营养物质含量)]

**营养物质保留效率及养殖废物排放** 碳保留效率(Carbon retention efficiency, CRE)、氮保留效率(Nitrogen retention efficiency, NRE)、磷保留效率(Phosphorus retention efficiency, PRE)、碳废物排放(Carbon waste output, CWO)、氮废物排放(Nitrogen waste output, NWO)和磷废物排放(Phosphorus waste output, PWO)计算公式:

$$\mathrm{CRE}\ (\%)=(m_t\times C_{Ct}-m_0\times C_{C0}+m_d\times C_{C0})/(I\times C_{Cf})\times 100$$

$$\mathrm{NRE}\ (\%)=(m_t\times C_{Nt}-m_0\times C_{N0}+m_d\times C_{N0})/(I\times C_{Nf})\times 100$$

$$\mathrm{PRE}\ (\%)=(m_t\times C_{Pt}-m_0\times C_{P0}+m_d\times C_{P0})/(I\times C_{Pf})\times 100$$

$$\mathrm{CWO}\ (\mathrm{g/kg})=1000\times(I\times C_{Cf})\times(I-\mathrm{NRE}/100)/(m_t-m_0+m_d)$$

$$\mathrm{NWO}\ (\mathrm{g/kg})=1000\times(I\times C_{Nf})\times(I-\mathrm{NRE}/100)/(m_t-m_0+m_d)$$

$$\mathrm{PWO}\ (\mathrm{g/kg})=1000\times(I\times C_{Pf})\times(I-\mathrm{NRE}/100)/(m_t-m_0+m_d)$$

式中, $I$为实验期间每个养殖桶的饲料投喂量, g; $m_0$和$m_t$分别为实验开始和结束时鱼体质量, g; $t$为实验时间, d; $m_d$为每个鱼桶内死鱼的总质量, g; $C_{C0}$和$C_{Ct}$分别为实验开始和结束时鱼体碳的含量, %; $C_{N0}$和$C_{Nt}$分别为实验开始和结束时鱼体氮的含量, %; $C_{P0}$和$C_{Pt}$分别为实验开始和结束时鱼体磷的含量, %; $C_{Cf}$、$C_{Nf}$和$C_{Pf}$分别为饲料碳、氮、磷的含量, %。

### 1.6　序列处理与分析

使用Trimmomatic v0.33处理微生物序列原始数据, 用定制Perl脚本获得高质量序列, 并通过Cutadapt 1.9.1去除引物序列。通过FLASH v1.2.7进一步序列组装, UCHIME v4.2剔除嵌合体, 去除嵌合体后, 输出去噪、无嵌合体的ASV序列及其丰度。采用UCLUST v1.2.22q对Silva 16S rRNA数据库进行注释分析(70%相似度阈值)。为确保测序深度, 样本序列进行稀疏曲线分析, 并进行抽平处理。计算Chao1指数(Chao1)、香农指数(Shannon)和辛普森指数(Simpson)来评估α多样性。基于ASV相对丰度数据, 使用Bray-Curtis距离转换来评估β多样性。

### 1.7　数据分析

数据用平均值±标准误(mean±SE)表示, 数据的正态分布和方差齐性通过SPSS 22.0 软件中的Shapiro Wilk检验和Levene检验分别进行评估。满足正态分布且方差齐性采用独立样本$t$检验(Independent sample $t$-test)比较两处理组的差异, 方差不齐性采用Welch修正的$t$检验比较两处理组的差异。采用置换多元方差分析(Permutational multivariate analysis of variance, PERMANOVA)比较各组微生物群落结构差异。$P$<0.05认为具有显著性差异。所有图采用RStudio (2025)进行制作。

## 2　结果

### 2.1　大口黑鲈的生长性能和形体指标

如表 2所示, 两组大口黑鲈的存活率均为100%, 未观察到死亡个体。与D1组相比, D2组终末体重(FBW)、增重率(WGR)和特定生长率(SGR)显著提高($P$<0.05)。两组间的摄食量无显著性差异($P$>0.05), 但D2组的饲料系数(FCR)显著低于D1组($P$<0.05)。如表 3所示, D1组与D2组之间鲈肥满度(CF)差异不显著($P$>0.05), 而肝体比(HSI)与脏体比(VSI)在两组之间均存在显著差异($P$<0.05)。其中, D1组的HSI显著高于D2组, 而D2组的VSI显著高于D1组($P$<0.05)。

### 2.2　大口黑鲈的肌肉营养组分及氨基酸组成

由表 4可知, 两种膨化温度饲料对大口黑鲈肌肉营养组分及氨基酸组成均无显著影响($P$>0.05)。

### 2.3　大口黑鲈饲料蛋白质和磷的表观消化率

如表 5所示, 两种膨化温度对大口黑鲈饲料磷的表观消化率(ADC-P)无显著影响($P$>0.05), 而D2组蛋白质表观消化率(ADC-Protein)显著高于D1组($P$<0.05)。

### 2.4　大口黑鲈养殖的营养废物排放

如表 6所示, 不同膨化温度对饲料中各元素含量无明显影响。然而, D2组大口黑鲈的碳保留效率(CRE)、磷保留效率(PRE)均显著高于D1组($P$<0.05); 尽管D2组的氮保留效率(NRE)略高, 但两组间无显著差异($P$>0.05)。由表 7可知, 两种膨化温度饲料对大口黑鲈粪便和全鱼的碳、氮和磷的含量均无显著影响($P$>0.05)。由表 8可知, D1组碳废物排放(CWO)、氮废物排放(NWO)和磷废物排放(PWO)均显著高于D2组($P$<0.05), 两组间的CWO/NWO、CWO/PWO和NWO/PWO比值均无显著差异($P$>0.05)。

### 2.5　大口黑鲈消化道微生物组成与群落结构

由表 9可知, 两种不同膨化温度饲料对大口黑鲈胃部和肠道菌群的香农指数、Chao1指数、辛普森指数均无显著影响($P$>0.05)。由图 1A可知, 在两种不同膨化温度饲料下, 大口黑鲈消化道菌群门水平的优势物种主要包括变形菌门、厚壁菌门、梭

**表 2　两种膨化温度饲料对大口黑鲈生长性能的影响**

Tab. 2　The effects of diets extruded at two temperatures on growth performance of largemouth bass

| 指标Indicator | 组别Group | | $P$值 $P$ Value |
|---|---|---|---|
| | D1 | D2 | |
| 初体重IBW (g) | 27.73±0.06 | 27.78±0.02 | 0.757 |
| 末体重FBW (g) | 122.75±0.76 | 127.64±1.37 | 0.037 |
| 增重率WGR (%) | 342.99±2.49 | 359.51±4.05 | 0.026 |
| 摄食率FR (%/d) | 1.63±0.01 | 1.60±0.02 | 0.185 |
| 特定生长率SGR (%) | 2.36±0.01 | 2.42±0.01 | 0.025 |
| 饲料系数FCR | 0.92±0.01 | 0.88±0.01 | 0.033 |
| 存活率Survival rate (%) | 100 | 100 | 1.000 |

注: $P$<0.05表示两组之间存在显著差异; 下同

Note: $P$<0.05 indicates significant differences between the two groups; The same applies below

**表 3　两种膨化温度饲料对大口黑鲈形体指标的影响**

Tab. 3　The effects of diets extruded at two temperatures on morphological indicators of largemouth bass

| 指标Indicator | 组别Group | | $P$值 $P$ Value |
|---|---|---|---|
| | D1 | D2 | |
| 肥满度CF (g/cm$^3$) | 2.38±0.07 | 2.36±0.03 | 0.673 |
| 肝体比HSI | 3.46±0.09 | 3.16±0.13 | 0.020 |
| 脏体比VSI | 13.01±0.11 | 14.32±0.42 | 0.026 |

杆菌门、放线菌门和拟杆菌门。其中, 胃部优势物种主要包括变形菌门、梭杆菌门和蓝细菌门。与DS1组相比, DS2组大口黑鲈胃部的蓝细菌门丰度减少, 梭杆菌门丰度增加(图 1A)。在属水平上, 大口黑鲈肠道优势物种主要包括无色杆菌属、支原体属、戴尔福特菌属和葡萄球菌属, 而其胃部的优势物种以无色杆菌属、戴尔福特菌属、短波单胞菌属和鲸杆菌属为主。与DS1组相比, DS2组大口黑鲈肠道的鲸杆菌属丰度增加, 葡萄球菌属丰度减少; 其胃部的支原体属和潘多拉菌属丰度增加, 葡萄球菌属丰度减少(图 1B)。图 1C探讨了大口黑鲈消化道微生物群落结构, 结果显示: 在不同膨化温度饲料投喂下, 两组大口黑鲈的胃部和肠道群落结构均没有显著性差异($P$>0.05); 但胃部和肠道微生物差异显著($P$<0.05)。

**表 4 两种膨化温度饲料对大口黑鲈肌肉的营养组分及氨基酸组成的影响(%干物质)**

Tab. 4 The effects of diets extruded at two temperatures on nutritional composition and amino acid profile of the muscle of largemouth bass (% dry matter)

| 指标Indicator | 肌肉Muscle | | $P$值 $P$ Value |
|---|---|---|---|
| | D1 | D2 | |
| 蛋白质Protein | 18.73±0.13 | 18.54±0.19 | 0.235 |
| 脂肪Fat | 2.64±0.09 | 2.58±0.11 | 0.505 |
| 必需氨基酸EAA | | | |
| 苏氨酸Thr | 0.79±0.02 | 0.8±0.01 | 0.427 |
| 缬氨酸Val | 0.91±0.02 | 0.93±0.02 | 0.547 |
| 蛋氨酸Met | 0.56±0.02 | 0.54±0.02 | 0.475 |
| 异亮氨酸Ile | 0.83±0.02 | 0.85±0.02 | 0.456 |
| 亮氨酸Leu | 1.41±0.03 | 1.45±0.02 | 0.346 |
| 苯丙氨酸Phe | 0.74±0.01 | 0.76±0.01 | 0.346 |
| 赖氨酸Lys | 1.72±0.04 | 1.77±0.02 | 0.437 |
| 组氨酸His | 0.37±0.01 | 0.38±0.01 | 0.329 |
| 精氨酸Arg | 1.05±0.02 | 1.07±0.01 | 0.402 |
| 非必需氨基酸NEAA | | | |
| 天冬氨酸Asp | 1.73±0.03 | 1.76±0.02 | 0.495 |
| 丝氨酸Ser | 0.69±0.01 | 0.71±0.00 | 0.184 |
| 谷氨酸Glu | 2.75±0.06 | 2.81±0.03 | 0.385 |
| 甘氨酸Gly | 0.92±0.01 | 0.97±0.01 | 0.104 |
| 丙氨酸Ala | 1.05±0.02 | 1.07±0.02 | 0.387 |
| 胱氨酸Cys | 0.09±0.00 | 0.08±0.01 | 0.561 |
| 酪氨酸Tyr | 0.55±0.02 | 0.55±0.02 | 0.907 |
| 脯氨酸Pro | 0.53±0.02 | 0.5±0.02 | 0.226 |

**表 5 两种膨化温度饲料下大口黑鲈饲料蛋白质和磷的表观消化率**

Tab. 5 Apparent digestibility coefficients of crude protein and phosphorus in largemouth bass fed diets extruded at two temperatures (%)

| 指标Indicator | 组别Group | | $P$值 $P$ Value |
|---|---|---|---|
| | D1 | D2 | |
| 蛋白质表观消化率 ADC-Protein | 85.80±0.61 | 88.25±1.33 | 0.032 |
| 磷表观消化率 ADC-P | 60.89±0.91 | 59.32±2.34 | 0.565 |

**表 6 两种膨化温度饲料的碳、氮和磷含量及其保留效率**

Tab. 6 The content and retention efficiency of carbon, nitrogen, and phosphorus in diets extruded at two temperatures (%)

| 指标Indicator | 组别Group | | $P$值 $P$ Value |
|---|---|---|---|
| | D1 | D2 | |
| 碳C | 41.90 | 42.05 | |
| 氮N | 7.71 | 7.83 | |
| 磷P | 0.64 | 0.63 | |
| 碳保留效率CRE | 39.78±0.21 | 41.70±0.46 | 0.020 |
| 氮保留效率NRE | 41.75±0.93 | 43.58±0.08 | 0.223 |
| 磷保留效率PRE | 27.91±1.52 | 30.7±0.77 | 0.040 |

**表 7 大口黑鲈全鱼与粪便的碳、氮和磷含量**

Tab. 7 The content of carbon, nitrogen, and phosphorus in largemouth bass and the feces (%)

| 组别 Group | 全鱼Whole fish | | $P$值 $P$ Value | 粪便Feces | | $P$值 $P$ Value |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | D1 | D2 | | D1 | D2 | |
| 碳C | 14.53±0.11 | 14.64±0.23 | 0.692 | 26.02±1.34 | 24.71±0.35 | 0.401 |
| 氮N | 2.94±0.06 | 2.97±0.02 | 0.648 | 2.81±0.06 | 2.58±0.20 | 0.320 |
| 磷P | 0.73±0.03 | 0.74±0.01 | 0.673 | 3.16±0.07 | 3.20±0.09 | 0.727 |

**表 8 生产每千克大口黑鲈的碳、氮和磷废物排放量**

Tab. 8 Carbon, nitrogen, and phosphorus waste outputs for the production of per kilogram of largemouth bass (g/kg)

| 指标Indicator | 组别Group | | $P$值 $P$ Value |
|---|---|---|---|
| | D1 | D2 | |
| 碳废物排放CWO | 232.04±0.53 | 215.82±2.46 | 0.003 |
| 氮废物排放NWO | 41.31±0.49 | 38.91±1.07 | 0.017 |
| 磷废物排放PWO | 19.00±0.48 | 16.99±0.39 | 0.032 |
| CWO/NWO | 5.62±0.07 | 5.55±0.12 | 0.677 |
| CWO/PWO | 12.23±0.29 | 12.71±0.23 | 0.263 |
| NWO/PWO | 2.18±0.07 | 2.29±0.01 | 0.171 |

## 3 讨论

### 3.1 膨化温度对大口黑鲈生长性能的影响

饲料原料组成和加工工艺是影响养殖鱼类生长性能的重要因素。本研究结果显示, 在饲料配方一致的前提下, 膨化温度增加至140℃显著提高了大口黑鲈的终末体重、增重率和特定生长率。Zhou等[22]在斑点叉尾鮰(*Ictalurus punctatus*)的研究中也报道了类似的结果; Sørensen等[23]在虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)的研究中发现, 相较于103℃的膨化

温度, 137℃加工的饲料显著提高了其特定生长率。这表明较高的膨化温度可以提高饲料的利用效率。饲料膨化挤压温度在107℃时, 杂交条纹鲈(*Morone chrysops* × *M. saxatilis*)[24]的生长性能较低, 当挤压温度提升至127℃时, 杂交条纹鲈的生长性能显著提高。此外, 高温膨化可有效降低植物蛋白源中部分抗营养因子, 如蛋白酶抑制剂和植酸等, 这可能进一步促进蛋白质和矿物质的吸收利用[25]。尽管不同膨化温度的饲料未显著影响肌肉的蛋白质与脂肪含量及氨基酸组成, 但形体指标中的肝体

**表 9　两种膨化温度饲料对大口黑鲈消化道微生物alpha多样性的影响**

Tab. 9　Alpha diversity of gastrointestinal microbiota of largemouth bass fed diets extruded at two temperatures

| 指标Indicator | 胃Stomach | | *P*值 *P* Value | 肠道Gut | | *P*值 *P* Value |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | DS1 | DS2 | | DG1 | DG2 | |
| Chao1指数Chao1 | 645.7±305.9 | 497.6±194.1 | 0.101 | 626.5±234.4 | 595.9±313.4 | 0.289 |
| 香农指数Shannon | 5.9±1.1 | 4.9±1.2 | 0.347 | 4.6±0.9 | 5.7±2.2 | 0.140 |
| 辛普森指数Simpson | 0.9±0.1 | 0.9±0.1 | 1.000 | 0.8±0.1 | 0.9±0.1 | 0.890 |

注: DS1. D1组大口黑鲈胃部微生物; DS2. D2组大口黑鲈胃部微生物; DG1. D1组大口黑鲈肠道微生物; DG2. D2组大口黑鲈肠道微生物; 下同

Note: DS1. Stomach microbiota in largemouth bass from D1 group; DS2. Stomach microbiota in largemouth bass from D2 group; DG1. Gut microbiota in largemouth bass from D1 group; DG2. Gut microbiota in largemouth bass from D2 group; The same applies below

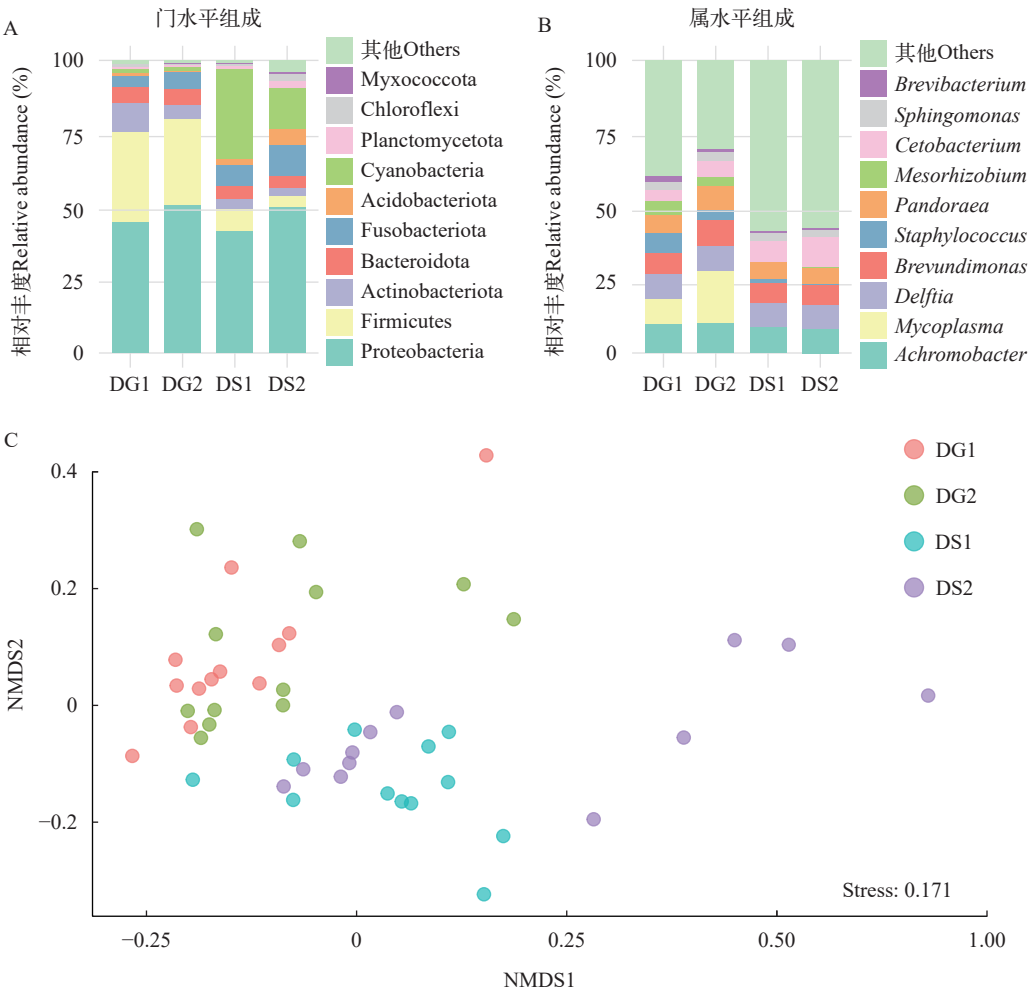



图 1　两种膨化温度饲料对大口黑鲈消化道微生物组成和群落结构的影响

Fig. 1　The composition and community structure of the gastrointestinal microbiota of largemouth bass fed diets extruded at two temperatures

A和B分别表示在门和属水平上的物种相对丰度; C基于Bray-Curtis相似性非度量多维尺度分析(NMDS)的消化道微生物组分析

A and B represent the relative abundance of gastrointestinal microbiota at the phylum and genus levels, respectively; C represents analysis of non-metric multidimensional scaling (NMDS) with Bray-Curtis similarity of the gastrointestinal microbiota

比和脏体比呈现显著差异。形体指标是反映动物状况和环境条件的生物指标。D1组大口黑鲈肝体比较高, 可能反映了肝脏脂质沉积或代谢压力较大; 而D2组较高的脏体比则可能与肠道和内脏功能的增强有关。类似研究指出, 高于127℃可能会引起饲料的可消化性发生改变, 而较低温度可能会影响肝脏脂质沉积及肠道负荷[24], 这在一定程度上解释了本研究中不同温度处理下的形体指标变化。较低的肝体比往往被视为肝脏健康和高代谢效率的表现, 说明饲料高温膨化处理有助于保持鲈良好的生理状态。

### 3.2 膨化温度对营养物质消化率和保留效率的影响

本研究结果显示, 在以鱼粉和豆粕为蛋白源的前提下, 饲料膨化加工温度由120℃升高到140℃时, 饲料蛋白质的表观消化率显著升高, 磷的表观消化率无显著影响。本研究结果与其他鱼类研究的结果一致。在虹鳟的研究中, Sørensen等[26]以鱼粉为主要蛋白源, 膨化温度从110℃升至141℃时, 蛋白质表观消化率升高但无显著差异; Barrows等[27]在以豆粕为主要蛋白源时, 发现将膨化温度由93℃升高至127℃时, 蛋白质的表观消化率升高。Das等[28]在鲤(*Cyprinus carpio*)的研究中发现, 将膨化温度从110℃升高至170℃时, 蛋白质消化率呈上升趋势。与本研究结果不同的是, Ljøkjel等[29]在水貂(*Mustela vison*)的研究中发现, 将饲料加工温度由100℃提高到150℃时, 水貂的蛋白质消化率降低。这可能是水貂具有高度专化的消化道[29], 蛋白质的消化过程主要依赖胃蛋白酶和胰蛋白酶, 过度加热可能导致蛋白质变性, 也可能是蛋白源的不同而导致。本研究使用鱼粉为主要蛋白源, 鱼粉在适度加热时导致其中的蛋白质可发生一定程度的变性与空间结构松散[25], 从而提高酶解效率。值得注意的是, 尽管磷的表观消化率未显著变化, D2组的磷保留效率却显著提高, 表明高温膨化促进了饲料效率, 同时可能改善了磷的生物利用性。这可能与植酸磷结合被破坏有关, 鱼类更易吸收可利用磷[23]。此外, D2组的碳保留效率也显著高于D1组, 进一步说明适当提高饲料膨化温度不仅提高了营养素的消化利用, 也提升了其在鱼体的沉积效率, 有助于提高饲料的实际营养价值。

### 3.3 膨化温度对养殖废物排放的影响

养殖过程中未被利用的碳、氮、磷最终通过残饵、粪便和代谢废物排放至水体中, 是导致水体富营养化和环境污染的主要来源[21]。本研究结果表明, D2组在单位生产大口黑鲈基础上的碳、氮、磷废物排放量均显著低于D1组。这与其较高的营养保留效率密切相关, 表明更多营养成分被鱼体吸收和利用, 减少了营养排泄损失。此外, 较低的排放有助于降低养殖环境富营养化风险, 减缓水体污染[21]。Refstie等[19]也指出, 通过改善加工工艺可显著减少鱼类代谢产物中氮磷排放, 提升养殖系统的环境友好性。结合本研究结果, 可认为140℃的膨化温度在提高饲料利用的同时, 也可推动环境友好型养殖目标的实现。

### 3.4 膨化温度对肠道微生物的影响

本研究结果表明, 饲料膨化温度在120—140℃内未显著改变大口黑鲈消化道菌群的α多样性和群落结构, 但在物种组成上观察到一定差异。在最新研究中, Zhang等[30]在草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)的研究中指出, 以植物蛋白源为主的饲料相比于以鱼粉为主的饲料在高膨化温度处理后引起肠道核心菌群的显著变动, 可能与植物蛋白源中大量抗营养因子的破坏和底物组成的变化有关。对比可知, 饲料膨化温度对肠道菌群的影响不仅与饲料加工温度本身相关, 也受到饲料蛋白源种类和鱼类营养类型(如食性)的共同作用。已有研究表明, 饲料的加工工艺, 尤其是膨化温度, 能够影响肠道内容物的理化状态和底物降解速率, 从而影响微生物的组成和代谢活动[23, 26]。研究表明, 膨化加工所引起的肠道微生物群落结构改变, 可能与鱼类生长性能的改善相关[31]。尽管饲料膨化温度的提升对鲈鱼消化道微生物多样性无显著影响，但饲料膨化处理增加了克氏原螯虾肠道变形菌门的丰度和微生物的多样性，同时提升了饲料利用率[12]。因此, 未来研究应关注饲料加工对水产动物肠道微生物组功能的潜在影响, 深入理解肠道微生物在饲料利用和营养吸收方面的作用机制。

## 4 结论

本文研究了饲料膨化加工温度对大口黑鲈生长性能、消化道菌群结构、营养物质消化率及养殖废物排放的影响。结果表明, 适当地提高膨化温度至140℃可增加大口黑鲈的终末体重、增重率和特定生长率, 且未对消化道菌群结构产生显著影响。同时, 该膨化温度提高蛋白质的表观消化率, 但对肌肉营养和氨基酸组成无显著影响; 该膨化温度还能促进碳、氮、磷的保留效率, 显著降低养殖废物的排放量。这说明将膨化加工温度提升至140℃不仅能有效改善大口黑鲈的饲料利用效率与生长性能, 还能减少养殖污染, 为绿色高效的水产饲料生产提供了重要参考。

(作者声明本文符合出版伦理要求)

## 参考文献:


[1] Liu J J, Zhang J Y, Yuan H. The investigation and analysis about cost and benefit of freshwater fish breeding [J]. *Chinese Fisheries Economics*, 2017, **35**(1): 18-27. [刘景景, 张静宜, 袁航. 淡水鱼养殖成本收益调查与分析 [J]. 中国渔业经济, 2017, **35**(1): 18-27.]

[2] Wang M, Guo S D, Li J G, *et al*. Application of extrusion technology in aquatic feed production [J]. *Feed and Animal Husbandry*, 2011(3): 42-43. [汪沐, 过世东, 李军国, 等. 挤压膨化技术在水产饲料生产中的应用 [J]. 饲料与畜牧, 2011(3): 42-43.]

[3] Xu Q. Aquatic feed extrusion technology and application innovation [J]. *Guangdong Feed*, 2017, **26**(7): 16-18. [徐倩. 水产饲料膨化技术与应用创新 [J]. 广东饲料, 2017, **26**(7): 16-18.]

[4] Cheng Z J, Hardy R W. Effects of extrusion processing of feed ingredients on apparent digestibility coefficients of nutrients for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2003, **9**(2): 77-83.

[5] Liu F, Li Y F. Application of extrusion technology in aquatic feed production [J]. *Guangdong Feed*, 2016, **25**(11): 37-39. [刘凡, 李艳芳. 挤压膨化技术在水产饲料生产中的应用 [J]. 广东饲料, 2016, **25**(11): 37-39.]

[6] Qin Y. Effects of extrusion on the physical properties and nutritional quality of several feedstuffs [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2020: 1-5. [秦毅. 挤压膨化对几种饲料原料物性及营养品质影响的研究 [D]. 郑州: 河南工业大学, 2020: 1-5.]

[7] Sørensen M. A review of the effects of ingredient composition and processing conditions on the physical qualities of extruded high-energy fish feed as measured by prevailing methods [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2012, **18**(3): 233-248.

[8] Gao S, Jin J, Liu H, *et al*. Effects of pelleted and extruded feed of different ingredients particle sizes on feed quality and growth performance of gibel carp (*Carassius gibelio* var. CAS V) [J]. *Aquaculture*, 2019(511): 734236.

[9] Cheng Y F, Guo S D. Effect of expanding on in-vitro protein digestibility and starch gelatinization of feedstuff [J]. *Fishery Modernization*, 2009, **36**(6): 54-59. [程译锋, 过世东. 膨化参数对饲料淀粉糊化度和蛋白质体外消化率的影响 [J]. 渔业现代化, 2009, **36**(6): 54-59.]

[10] Liu X, Wang Y, Liu H, *et al*. A systematic review on aquaculture wastewater: Pollutants, impacts, and treatment technology [J]. *Environmental Research*, 2024(262): 119793.

[11] Cao K. Feed process & quality control-Main points of quality control and trend of process for modern aquatic feed [J]. *Feed Industry*, 2014, **35**(1): 9-16. [曹康. “饲料质量控制与加工工艺”—现代水产饲料加工质量控制要点与加工工艺发展趋势 [J]. 饲料工业, 2014, **35**(1): 9-16.]

[12] Wan J, Xi Q, Tang J, *et al*. Effects of pelleted and extruded feed on growth performance, intestinal histology and microbiota of juvenile red swamp crayfish (*Procambarus clarkii*) [J]. *Animals*, 2022, **12**(17): 2252.

[13] Lu F H, Yan Z Q, Wu L M, *et al*. Research on the standards system of largemouth bass [J]. *China Standardization*, 2025(8): 94-98. [路风辉, 闫志强, 吴鹿鸣, 等. 大口黑鲈标准体系研究 [J]. 中国标准化, 2025(8): 94-98.]

[14] Wu G Z. Key techniques of pond culture of largemouth bass [J]. *China Fisheries*, 2025(3): 71-73. [武国兆. 大口黑鲈池塘养殖关键技术 [J]. 中国水产, 2025(3): 71-73.]

[15] Chen H, Yu J, Ran X, *et al*. Effects of yellow mealworm (*Tenebrio molitor*) on growth performance, hepatic health and digestibility in juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Animals*, 2023, **13**(8): 1389.

[16] Zhang Q, Liang H, Xu P, *et al*. Effects of enzymatic cottonseed protein concentrate as a feed protein source on the growth, plasma parameters, liver antioxidant capacity and immune status of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Metabolites*, 2022, **12**(12): 1233.

[17] Liu Y, Lu Q, Xi L, *et al*. Effects of replacement of dietary fishmeal by cottonseed protein concentrate on growth performance, liver health, and intestinal histology of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Frontiers in Physiology*, 2021(12): 764987.

[18] Xu X, Yang H, Zhang C, *et al*. Effects of replacing fishmeal with cottonseed protein concentrate on growth performance, flesh quality and gossypol deposition of largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Aquaculture*, 2022(548): 737551.

[19] Tao J, Wang S, Qiu H, *et al*. Modulation of growth performance, antioxidant capacity, non-specific immunity and disease resistance in largemouth bass (*Micropterus salmoides*) upon compound probiotic cultures inclusion [J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2022(127): 804-812.

[20] Zhou X, Wang Y, Yu J, *et al*. Effects of dietary fermented Chinese herbal medicines on growth performance, digestive enzyme activity, liver antioxidant capacity, and intestinal inflammatory gene expression of juvenile largemouth bass (*Micropterus salmoides*) [J]. *Aquaculture Reports*, 2022(25): 101269.

[21] AOAC, Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists [M]. 17th ed. Association of Official Analytical Chemists, Arlington, VA, USA., 2003.

[22] Peres H, Lim C, Klesius P H. Nutritional value of heat-treated soybean meal for channel catfish (*Ictalurus punctatus*) [J]. *Aquaculture*, 2003, **225**(1-4): 67-82.

[23] Sørensen M, Storebakken T, Shearer K D. Digestibility, growth and nutrient retention in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed diets extruded at two different temperatures [J]. *Aquaculture Nutrition*, 2005, **11**(4): 251-256.

[24] Bowzer J, Page M, Trushenski J T. Extrusion temperature and pellet size interact to influence growth performance of hybrid striped bass fed industrially compounded aquafeeds [J]. *North American Journal of Aquaculture*, 2016, **78**(4): 284-294.

[25] Sugiura S H, Raboy V, Young K A, *et al*. Availability of phosphorus and trace elements in low-phytate varieties of barley and corn for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquaculture*, 1999, **170**(3/4): 285-296.

[26] Sørensen M, Ljøkjel K, Storebakken T, *et al*. Apparent digestibility of protein, amino acids and energy in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed a fish meal based diet extruded at different temperatures [J]. *Aquaculture*, 2002, **211**(1-4): 215-225.

[27] Barrows F T, Stone D A J, Hardy R W. The effects of extrusion conditions on the nutritional value of soybean meal for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. *Aquaculture*, 2007, **265**(1-4): 244-252.

[28] Das K C, Mohanta K N, Nayak S K, *et al*. Effect of extrusion temperature on quality of carp floating feed prepared from local feed resources [J]. *Animal Nutrition and Feed Technology*, 2018, **18**(1): 117-123.

[29] Ljøkjel K, Sørensen M, Storebakken T, *et al*. Digestibility of protein, amino acids and starch in mink (*Mustela vison*) fed diets processed by different extrusion conditions [J]. *Canadian Journal of Animal Science*, 2004, **84**(4): 673-680.

[30] Zhang Z M, Yang Q S, Xu T T, *et al*. Influences of dietary protein source and extrusion temperature on growth performance, tissue composition, and gut microbiota of grass carp *Ctenopharyngodon idellus* [J]. *Aquaculture International*, 2024, **33**(1): 82.

[31] Barreto-Curiel F, Ramirez-Puebla S T, Ringø E, *et al*. Effects of extruded aquafeed on growth performance and gut microbiome of juvenile *Totoaba macdonaldi* [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2018(245): 91-103.

# DIETARY EXTRUSION TEMPERATURE ON GROWTH PERFORMANCE, NUTRIENT DIGESTIBILITY, WASTE DISCHARGE, AND GASTROINTESTINAL MICROBIOTA OF LARGEMOUTH BASS (*MICROPTERUS SALMOIDES*)

GAO Jian-Kun[1, 2], CHEN Wen[2], LIU Hao-Kun[2], JIN Jun-Yan[2], HAN Dong[2, 3, 4], YANG Yun-Xia[2], ZHU Xiao-Ming[2], YANG Yong[5], LI Da-Peng[1], XIE Shou-Qi[2, 3, 4] and ZHANG Zhi-Min[2]

(1. *College of Fisheries*, *Huazhong Agricultural University*, *Wuhan* 430070, *China*; 2. *State Key Laboratory of Breeding Biotechnology and Sustainable Aquaculture*, *Institute of Hydrobiology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Wuhan* 430072, *China*; 3. *Hubei Hongshan Laboratory*, *Wuhan* 430070, *China*; 4. *Hubei Engineering Research Center for Aquatic Animal Nutrition and Feed*, *Wuhan* 430072, *China*; 5. *Guangzhou Nutriera Biotechnology Co.*, *Ltd.*, *Guangzhou* 511483, *China*)

**Abstract**: This study investigated the effects of dietary extrusion temperature on growth performance, nutrient digestibility, waste discharge, and gastrointestinal microbiota of largemouth bass (*Micropterus salmoides*). Fish were fed diets containing 48% protein and 9% fat, extruded at two three-stage heating programs (D1: 100℃, 120℃, 120℃; D2: 100℃, 120℃, 140℃), in an indoor recirculating system for 63d. Compared to the D1 group, the D2 group exhibited significantly higher final body weight, weight gain rate, and specific growth rate, along with a lower feed conversion ratio ($P$<0.05). The D2 group also showed a significantly reduced hepatopancreas index but an increased viscerosomatic index ($P$<0.05). Nutrient retention efficiency of carbon and phosphorus and apparent protein digestibility were significantly improved in the D2 group ($P$<0.05), though apparent phosphorus digestibility did not differ between the two groups ($P$>0.05). While whole fish and fecal carbon, nitrogen, and phosphorus contents remained similar between groups ($P$>0.05), the D2 group showed significantly lower waste outputs ($P$<0.05). Distinct microbial communities were observed between the stomach and intestine ($P$<0.05), but extrusion temperature had no significant effect on alpha diversity of the digestive tract and the community structure ($P$>0.05). These findings suggest that moderately increasing extrusion temperature enhances growth performance and nutrient utilization in largemouth bass while maintaining microbial community stability and reducing aquaculture waste output.

**Key words**: Extruded feed; Growth performance; Waste discharge; Gastrointestinal microbiota; *Micropterus salmoides*