文章编号：1000-0615(2020)07-1156-17 水产学报, 2020, 44(7): 1156−1172

水产学报
JOURNAL OF FISHERIES OF CHINA
DOI: 10.11964/jfc.20191012029
Science Press

# 水体盐度与饲料脂肪含量对尼罗罗非鱼生长、营养组成和肉质的影响

吕宏波， 张志勇， 张美玲， 陈立侨， 杜震宇*， 乔 芳*

(华东师范大学生命科学学院，水生动物营养与环境健康实验室，上海 200241)

**摘要：**为研究水体盐度和饲料脂肪含量对尼罗罗非鱼生长、营养组成和肉质的影响，本实验设置 0、8 和 16 共 3 个盐度梯度，每个梯度分别投喂中脂 (6%) 和高脂 (12%) 饲料，投喂初始体质量为 (5.0±0.2) g 的尼罗罗非鱼 8 周，并测定生长性能、血清生化指标、肌肉营养成分和肉质相关指标。结果显示，在中脂饲料投喂下，与对照组 (盐度为 0) 和高盐组 (盐度为 16) 相比，中盐组 (盐度为 8) 的尼罗罗非鱼具有最大终末体质量、躯壳比、脂体比、肌肉蛋白质含量、肌肉氨基酸和乳酸含量和总产肉率，但其饲料系数、脏体比、肝体比和肌肉 pH 值显著降低；而中脂高盐组的尼罗罗非鱼其饲料系数、肥满度、脏体比、肝体比、全鱼总脂、肝脏甘油三酯、血糖、血清乳酸和血清甘油三酯含量、血清谷草转氨酶活性较高，但全鱼和肌肉水分、全鱼灰分、产肉率和肌肉离心失水率降低。在高脂饲料投喂下，随着盐度的上升，其终末体质量、成活率和脂体比降低，但饲料系数、脏体比、肝体比和肥满度增大。其中，高脂中盐组尼罗罗非鱼的肌肉蛋白以及氨基酸含量显著降低，而高脂高盐组的全鱼灰分、肝脏甘油三酯、血糖、谷草转氨酶活性、肌肉总脂、肌肉甘油三酯和磷脂含量显著提高，但全鱼总脂、肝糖原、产肉率、肌肉离心失水率和 pH 值显著降低。而不论在淡水还是盐水养殖情况下，与中脂饲料组相比，高脂饲料组尼罗罗非鱼均显示出更高的脂肪积累量和肌肉乳酸含量，以及更低的成活率和产肉率。尤其在高盐度水体中，高脂饲料对尼罗罗非鱼肌肉脂肪和乳酸积累的促进作用和对成活率、饲料系数和产肉率的负面作用尤为明显。研究表明，在中脂饲料投喂下，适宜的盐度 (盐度 8) 可以促进尼罗罗非鱼的生长并提高肌肉品质，然而，在高盐度水体中使用高脂饲料对尼罗罗非鱼的生长与肉质则有较大的负面影响。

**关键词:** 尼罗罗非鱼；盐度；饲料脂肪；生长；营养组成；肉质

**中图分类号:** S 963.3 **文献标志码:** A

养殖水体的理化参数是影响养殖鱼类生长、代谢、肌肉营养组成和品质的重要因素。盐度是养殖水体中的重要理化因子之一，也是影响多种鱼类养殖范围和营养品质的重要限制因素[1]。已有一些文献指出，适宜的盐度可以促进一些鱼类的生长，如 Resley 等[2] 设置 0、5、15 和 30 共 4 个盐度梯度饲养军曹鱼 (*Rachycentron canadum*) 8 周，结果发现盐度为 5 的中盐组摄食率没有明显变化，但是呈现最大特定生长率和增重率。同时，Luz 等[3] 也证明金鱼 (*Carassius auratus*) 在盐度为 6 的半咸水中生长最好。此外，也有研究表明适度改变养殖水体的盐度，还可以改善经济鱼类的肌肉品质。梁拥军等[4] 指出盐度为 8 的半咸水显著增加肌肉中胶原蛋白和总蛋白质含量，减

**收稿日期：**2019-10-26 **修回日期：**2020-01-13

**资助项目：**国家重点研发计划 (2018YFD0900400)

**通信作者：**杜震宇，E-mail：zydu@bio.ecnu.edu.cn；乔芳，E-mail：fqiao@bio.ecnu.edu.cn

小了肌纤维直径和肌肉失水率，并且王艳等[5]发现适度降低盐度可以显著提高花鲈 (*Lateolabrax japonicus*)EPA 和 DHA 的含量，极大提高经济鱼类的营养价值。

饲料中的脂肪含量同样是影响鱼类生长和肉质的重要因素。随着饲料优质蛋白质源的日益匮乏，提高饲料脂肪含量以发挥“蛋白质节约效应”已成为水产饲料界的一个发展趋势[6]。然而，已有大量研究表明，过高的饲料脂肪水平会对养殖鱼类造成代谢损伤。Du 等[7]用高脂饲料 (脂肪水平为 10%) 投喂草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*) 8 周，与对照组 (脂肪水平为 2%) 相比，高脂饲料组摄食下降，血清脂质过氧化水平提高，肝脏中线粒体与过氧化物酶体脂肪酸氧化功能受到损伤。同时，也有报道称高脂饲料也会导致团头鲂 (*Megalobrama amblycephala*) 体内的氧化应激和肝细胞凋亡[8]。然而，饲料脂肪含量与水体盐度对鱼类生长、营养组成和肉质的影响，至今尚无足够文献报道。

尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 是我国重要的淡水经济鱼类。由于尼罗罗非鱼具有一定的盐度适应性，因此，从沿海到内陆，都有尼罗罗非鱼的养殖区域[9]。此外，本实验室的前期研究也表明，尼罗罗非鱼对高脂饲料具有一定的耐受力[10]。因此，尼罗罗非鱼是一种用于研究水体盐度和饲料脂肪含量综合效应的理想经济鱼类。本实验设置 0、8 和 16 共 3 个盐度梯度，每个梯度分别投喂中脂 (6%) 和高脂 (12%) 饲料，投喂初始体质量为 (5.0±0.2) g 的尼罗罗非鱼 8 周，测定其生长性能、血清生化指标、肌肉营养成分和肉质相关指标。本研究首次探讨了水体盐度与饲料脂肪含量的联合作用对尼罗罗非鱼生长和肉质的影响。

## 1　材料与方法

### 1.1　实验饲料

根据本实验室前期大量的工作基础，已经证明对于尼罗罗非鱼而言，投喂脂肪含量为 6% 的饲料时可正常生长，设为中脂饲料组 (对照组)，而投喂脂肪含量为 12% 的饲料则会出现脂肪显著积累的效果，设为高脂饲料组[11]。因此本实验以酪蛋白为主要蛋白源，以大豆油为脂肪源，淀粉为糖源，通过调整饲料中大豆油的含量，分别配制成饲料脂肪含量为 6% 和 12% 的中脂饲料和高脂饲料 (表 1)。各饲料原料粉碎后过 60 目筛，按照逐级放大法充分混合饲料原料，然后加入相应大豆油与适量水 (35%) 揉匀，经水产饲料专用挤条膨化机挤压成条，50 °C 烘至饲料水分在 10% 以下，用饲料粉碎机制成直径为 1 mm 的颗粒饲料，自封袋包装后放于−20 °C 冰箱中备用。

### 1.2　实验设计及饲养管理

实验所用尼罗罗非鱼购自广东添发鱼苗公司，鱼苗运送至本实验室后暂养 2 周直至稳定，暂养期间投喂商品饲料，使之逐渐适应配合饲料。挑选状态良好、初始体质量为 (5.0±0.2) g 的鱼均匀分到 18 个 256 L 的养殖缸中，每个养殖缸中 30 条鱼。实验组盐度设置为 0、8 和 16 共 3 个梯度，每个梯度分别投喂中脂 (6%) 和高脂 (12%) 2 种饲料，一共 6 个处理组，每个处理组 3 个重复。

实验于 2018 年 6—8 月进行，历时 8 周。养殖实验在华东师范大学生物实验站养殖房内进行，利用空调控制水温，日光灯照射时间为 7:00—19:00，用于模拟日常光照。养殖用水放于 3 个储水桶 (1 500 L) 中充分曝气，在其中 2 个储水桶中加入适量盐水晶调整盐度，并用盐度计校正，保证水体盐度分别为 8 (中盐度) 和 16 (高盐度)。投喂量为体质量的 4%，投喂后半小时收集残饵，烘干后称重以准确计算摄食率，每 2 周称一次体质量以调整投喂量。实验采用静水养殖，并且每个养殖缸内都采用相同大小的气石注入足量空气，每天利用虹吸管吸去粪便和污水，每次添加 30% 新水。实验期间保证水温为 28 °C，溶解氧含量高于 6.5 mg/L，pH 7.2~7.5。

### 1.3　样品采集

8 周养殖实验结束后，从每个养殖缸中取 2 尾鱼用于抽血及血清提取，每个处理为 3 个缸，一个处理组共计 6 尾鱼。将鱼用麻醉剂 MS-222 麻醉后，用无菌注射器抽取 1 mL 血液至离心管中，4 °C 静置 12 h，3 000 r/min 离心 10 min，取 100 μL 上层血清置于 2.0 mL 离心管中，储存于 −80 °C 冰箱中待测。另外，再从每个缸中取 2 尾鱼 (每个处理组 6 尾鱼)，采用相同方式麻醉后称重，取内脏团、肝脏、腹腔脂肪称重并保存至 −80 °C 冰箱做进一步分析。去头、去鳍、去皮后精确称量躯壳重，然后用手术刀切下背部白肌，其中一侧鲜样用做肉质分析，另一侧肌肉保存于−80 °C 冰箱用于后续生化实验，剩余躯体蒸煮

表 1 实验饲料配方

Tab. 1 Formulation of the experimental diets

%

| 项目 items | 中脂饲料 middle fat diet | 高脂饲料 high fat diet |
|---|---|---|
| **原料 ingredients** | | |
| 酪蛋白 casein | 32 | 32 |
| 明胶 gelatin | 8 | 8 |
| 豆油 soybean oil | 6 | 12 |
| 玉米淀粉 corn starch | 30 | 30 |
| 维生素预混料 vitamin premix[1] | 1.2 | 1.2 |
| 矿物质预混料 mineral premix[2] | 1.2 | 1.2 |
| 羧甲基纤维素钠 CMC | 3 | 3 |
| 纤维素 cellulose | 16.97 | 10.97 |
| 氯化胆碱 choline chloride | 0.5 | 0.5 |
| 2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚 BHT | 0.03 | 0.03 |
| 诱食剂 phagostimulant | 0.1 | 0.1 |
| 磷酸二氢钙 $Ca(H_2PO_4)_2$ | 1 | 1 |
| **常规成分组成 proximate composition** | | |
| 干物质 dry matter | 92.45 | 92.51 |
| 粗蛋白 crude protein | 35.89 | 35.79 |
| 粗脂肪 crude lipid | 5.95 | 11.8 |
| 粗灰分 crude ash | 5.25 | 5.19 |

注：1. 维生素预混料(mg/kg): 维生素A 172.0, 维生素$D_3$ 12.5, 维生素E 2 500.0, 维生素$K_3$ 5 000.0, 维生素$B_1$ 5 000.0, 维生素$B_2$ 5 000.0, 维生素$B_6$ 5 000.0, 维生素$B_{12}$ 5.0, 肌醇 25 000.0, 泛酸 10 000.0, 胆碱 100 000.0, 烟酸 2 500.0, 叶酸 1 000.0, 生物素 250.0, 维生素C 10 000.0。2. 矿物质预混料(g/kg): 硫酸镁 147.4, 氯化钠 49.8, 葡萄糖酸铁 10.9, 硫酸锌 3.12, 硫酸铜 0.62, 碘化钾 0.16, 氯化钴 0.08, 钼酸铵 0.06, 亚硒酸钠 0.02

Notes: 1. vitamin mixture(mg/kg): vitamin A 172.0, vitamin $D_3$ 12.5, vitamin E 2 500.0, vitamin$K_3$ 5 000.0，vitamin $B_1$ 5 000.0, vitamin $B_2$ 5 000.0, vitamin$B_6$ 5 000.0, vitamin $B_{12}$ 5.0, inositol 25 000.0, pantothenic acid 10 000.0, choline 100 000.0, niacin 2 500.0, folic acid 1 000.0, biotin 250.0, vitamin C 10 000.0. 2. mineral mixture (g/kg): $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 147.4, NaCl 49.8, Fe(II) gluconate 10.9, $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$ 3.12, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 0.62, KI 0.16, $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ 0.08, $(NH_4)_2 M_oO_4$ 0.06, $Na_2SeO_3$ 0.02

之后剔除残余肌肉并对鱼骨称重。8 周成活率、饲料系数、肥满度、躯壳比、脏体比、肝体比和脂体比的计算如下：

成活率 (survival rate，SR，%)=$(N_t/N_0)\times100\%$

饲料系数 (feed conversation ratio，FCR)=$W_f/(W_t-W_0)$

肥满度 (condition factor，CF，g/cm$^3$)=$W/L^3\times100$

躯壳比 (carcass ratio，CR，%)=$(W_t-W_d-W_s-W_v)/W_t\times100\%$

脏体比 (viscerosomatic index，VSI，%)=$W_v/W\times100\%$

肝体比 (hepatosomatic index，HSI，%)=$W_h/W\times100\%$

脂体比 (mesenteric fat index，MFI，%)=$W_m/W\times100\%$

产肉率 (meat yield，MY，%)=$(W_t-W_d-W_s-W_v-W_b)/W_t\times100\%$

式中，$N_t$ 为终末尾数，$N_0$ 为初始尾数，$W_f$ 为摄入饲料量 (g)，$W_t$ 为终末体质量 (g)，$W_0$ 为初始体质量 (g)，$W$ 为鱼体质量 (g)，$L$ 为鱼体长 (cm)，$W_d$ 为鱼头重 (g)，$W_S$ 为鱼鳍重 (g)，$W_v$ 为鱼内脏重 (g)，$W_h$ 为鱼肝脏重 (g)，$W_m$ 为鱼腹腔脂肪重 (g)，$W_b$ 为鱼骨重 (g )。

肝脏以及肌肉组织中的糖原、乳酸以及甘油三酯等生化成分的含量均采用南京建成生物工程研究所生产的相关试剂盒测定，称取一定重量组织后加入 9 倍的生理盐水，匀浆仪充分匀浆，其余操作均按试剂盒说明书进行；血清中的谷草转氨酶、谷丙转氨酶的活性，以及血糖、甘油三酯、乳酸和胆固醇的含量也用相应试剂

盒测试，每个指标均进行 6 个重复。

### 1.4　成分以及肉质分析

常规生化指标的测定　　每个处理组取 5 条鱼，麻醉后置于−20 °C 冰箱以供全鱼成分分析。全鱼以及肌肉常规成分分析：水分采用 105 °C 烘干法，粗蛋白采用凯氏定氮法 (FOSS Kjeltec 8200)，灰分采用 550 °C 灼烧法至恒重，粗脂肪采用氯仿—甲醇法，以上均参照国际标准法 AOAC(1995)[12]。

氨基酸含量测定和脂类分离及含量测定　　将收集好的每组 6 个肌肉样品两两混合，每个处理组 3 个重复，精确称取 20 mg 样品后放入棕色水解瓶中，管内加入 5 mL 浓度为 6 mol/L 的盐酸和 20 μL 苯酚，并在充氮气的状态下将水解瓶封口，水解瓶放入 105 °C 烘箱中水解 24 h。冷却至室温后，取 1 mL 水解液至玻璃管中，氮气吹干，加入 1 mL 0.02 mol/L 盐酸溶解，12 000 r/min 离心 15 min，取 700 μL 上清液转移至上样瓶中，本次检测使用日立 L-8900 型氨基酸自动分析仪。

肌肉脂肪中甘油三酯与磷脂的分离参照 Liu 等[13] 的薄层层析法 (TLC) 法。用氯仿—甲醇法提取出的 20 mg 肌肉总脂肪带状点样至薄层层析板上 (200 mm×200 mm)，以混合磷脂展层液 [ 乙酸甲酯：异丙醇：氯仿：甲醇：0.25%KCl(25：25：25：10：9, *V*/*V*/*V*/*V*/*V*)] 展层 100 min，50 °C 烘箱中干燥 30 min，转移至甘油三酯混合展层液 [ 异己烷：乙醚：乙酸 (80：25：1.5, *V*/*V*/*V*)] 展层 160 min，50 °C 烘箱中干燥 20 min，碘染 20 min 后，用薄层层析色谱扫描仪 (科哲 KH-3000 型) 分析脂类组成，肌肉中甘油三酯和磷脂的含量表示为 mg/g 肌肉，每个处理组做 6 个重复。

系水力与蒸煮损失率测定　　许多文献中采用离心失水率表示肌肉的系水力，本实验中离心失水率和蒸煮损失率的测试均参考以往的实验方法[14]，每个处理设置 6 个重复。

离心失水率：取新鲜鱼背部白肌 ($W_0$) 至离心管中，4 °C，2 000 r/min 离心 30 min，吸干肌肉表面水分后称重 ($W_1$)。则离心失水率 (%)=($W_0$−$W_1$)/$W_0$×100%。

蒸煮损失率：取新鲜鱼背部白肌 ($W_2$) 至离心管中，在离心管盖上扎一个通气孔后放入 75 °C 水浴锅中水浴 10 min，吸干肌肉表面水分后称重 ($W_3$)。则蒸煮损失率 (%)=($W_2$−$W_3$)/ $W_2$×100%。

### 1.5　pH 测定

参考 Pastoriza 等[15] 实验方法，将新鲜的鱼背部白肌放入离心管中，加入与肌肉等重的去离子水，匀浆仪充分匀浆，用雷磁 SJ-3F 型pH 计检测肌肉匀浆液中的 pH，每个处理组做 6 个重复。

### 1.6　数据分析

使用 SPSS 19(SPSS Inc., Chicago, IL) 软件进行单因素方差分析 (One-Way ANOVA)，结果用平均值±标准误 (mean±SE) 表示。同一种饲料投喂下，不同盐度之间的差异用 Turkey 检验；同种盐度下，不同饲料投喂组之间的差异使用 *t* 检验。每组数据在用单因素检验之后，再进行双因素检验盐度和饲料脂肪水平间的交互作用，显著性差异设为 $P$<0.05，极显著性差异设为 $P$<0.01。

## 2　结果

### 2.1　水体盐度与饲料脂肪含量对尼罗罗非鱼生长的影响

在中脂饲料投喂下，中盐度组尼罗罗非鱼的终末体质量、躯壳比和脂体比显著高于对照组和高盐度组 (图 1-a，1-e，1-h，$P$<0.05)，而饲料系数、肥满度、脏体比和肝体比则显著低于其余 2 组(图 1-c，1-d，1-f，1-g，$P$<0.05)；但高盐显著提高了尼罗罗非鱼的肥满度、脏体比与肝体比 (图 1-d，1-f，1-g，$P$<0.05)。在高脂饲料投喂下，盐度的升高显著降低了尼罗罗非鱼的终末体质量、成活率、躯壳比和脂体比 (图 1-a，1-b，1-e，1-h，$P$<0.05)，但升高了饲料系数、肥满度与脏体比 (图 1-c，1-d，1-f，$P$<0.05)。

在淡水养殖下，与中脂饲料组相比，高脂饲料投喂显著增加了尼罗罗非鱼的终末体质量和腹腔脂肪含量 (图 1-a，1-h，$P$<0.05)。在中盐度条件下，高脂饲料组尼罗罗非鱼的成活率显著降低，脏体比显著升高 (图 1-b，1-f，$P$<0.05)。在高盐度条件下，与中脂饲料组相比，高脂饲料组尼罗罗非鱼成活率显著降低 (图 1-b，$P$<0.05)。

双因素方差分析显示 (图 1)，脂肪水平 ($P_1$) 显著影响了尼罗罗非鱼的终末体质量、成活率、脏体比和脂体比 ($P_1$<0.05)。盐度水平 ($P_2$) 显著影响以上全部指标 ($P_2$<0.05)。2 种因素的交互作用 ($P_3$) 显著影响了尼罗罗非鱼的终末体质量、成活率、饲料系数和脂体比 ($P_3$<0.05)。由以上结果显示，中脂饲料投喂下的尼罗罗非鱼在中盐度条件下可获得较快的生长；而高脂饲料投喂下的

尼罗罗非鱼生长随着盐度增加出现生长减慢和死亡增加的现象。无论是中盐还是高盐条件下，高脂饲料的投喂都对尼罗罗非鱼的生长产生不利影响，尤其是高盐水环境和高脂饲料的交互作用加剧了对尼罗罗非鱼生长的负面影响。

### 2.2 水体盐度与饲料脂肪含量对尼罗罗非鱼体成分的影响

在中脂饲料投喂下，高盐处理显著升高了全鱼总脂、肝脏乳酸和甘油三酯的含量 (图 2-b，2-f，2-g，$P<0.05$)，但降低了全鱼水分和灰分 (图 2-c，2-d，$P<0.05$)。高脂饲料投喂下，高盐处理显著降低了全鱼总脂以及肝糖原含量 (图 2-b，2-e，$P<0.05$)，但全鱼灰分、肝脏乳酸和甘油三酯显著升高 (图 2-d，2-f，2-g，$P<0.05$)。

淡水养殖下，与中脂饲料组相比，高脂饲料显著增加了全鱼总脂、肝脏乳酸和甘油三酯的含量 (图 2-b，2-f，2-g，$P<0.05$)，同时显著降低了全鱼总蛋白、水分和灰分的含量 (图 2-a，2-c，2-d，$P<0.05$)。在中盐度水体中，与中脂饲料组相比，高脂饲料显著降低了全鱼灰分 (图 2-d，$P<0.05$)，却提高了肝脏乳酸含量 (图 2-f，$P<0.05$)。在高盐水体中，高脂饲料显著提高了全鱼灰分和肝脏乳酸 (图 2-d，2-f，$P<0.05$)，但显著降低

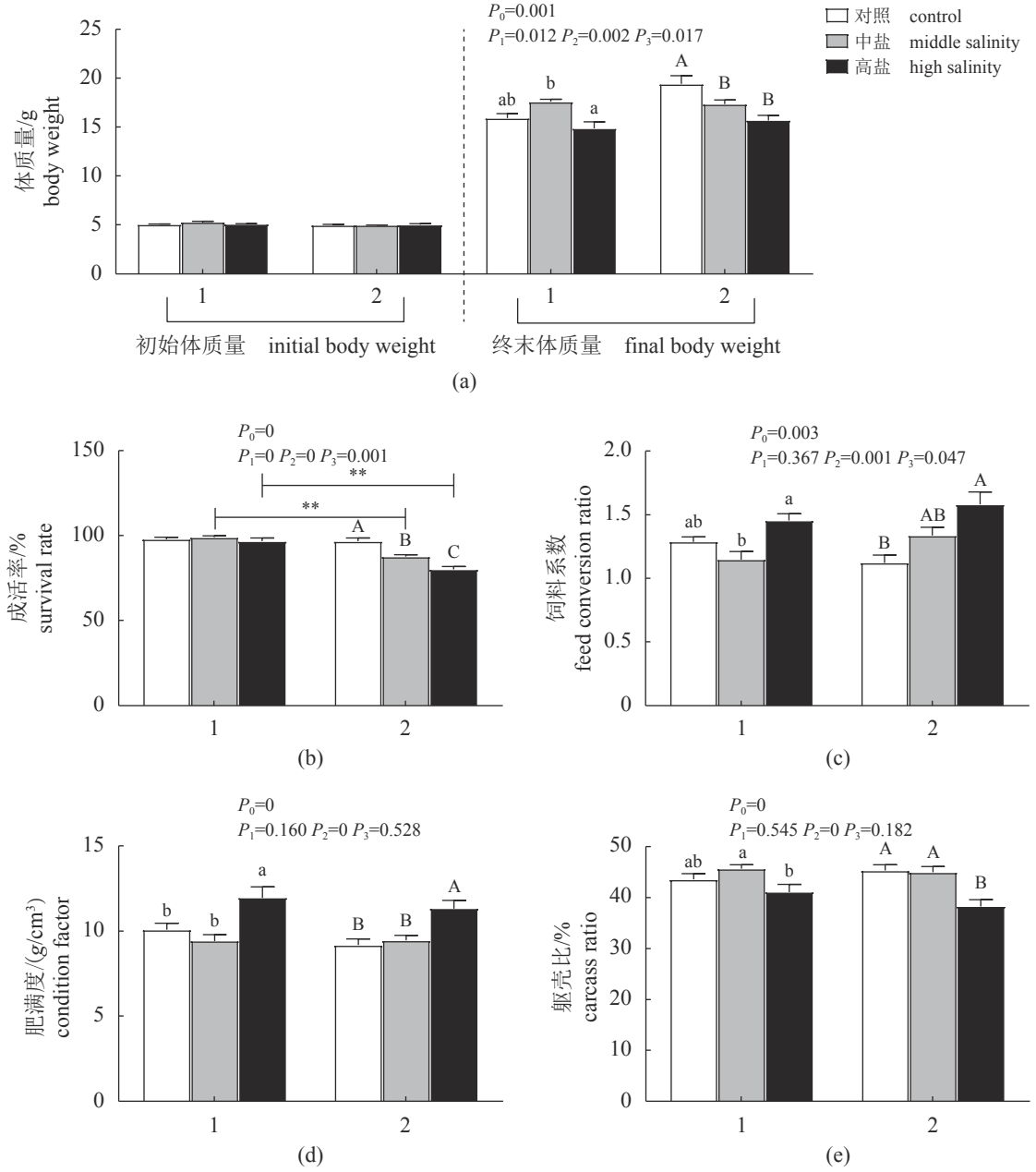


图 1 Fig. 1

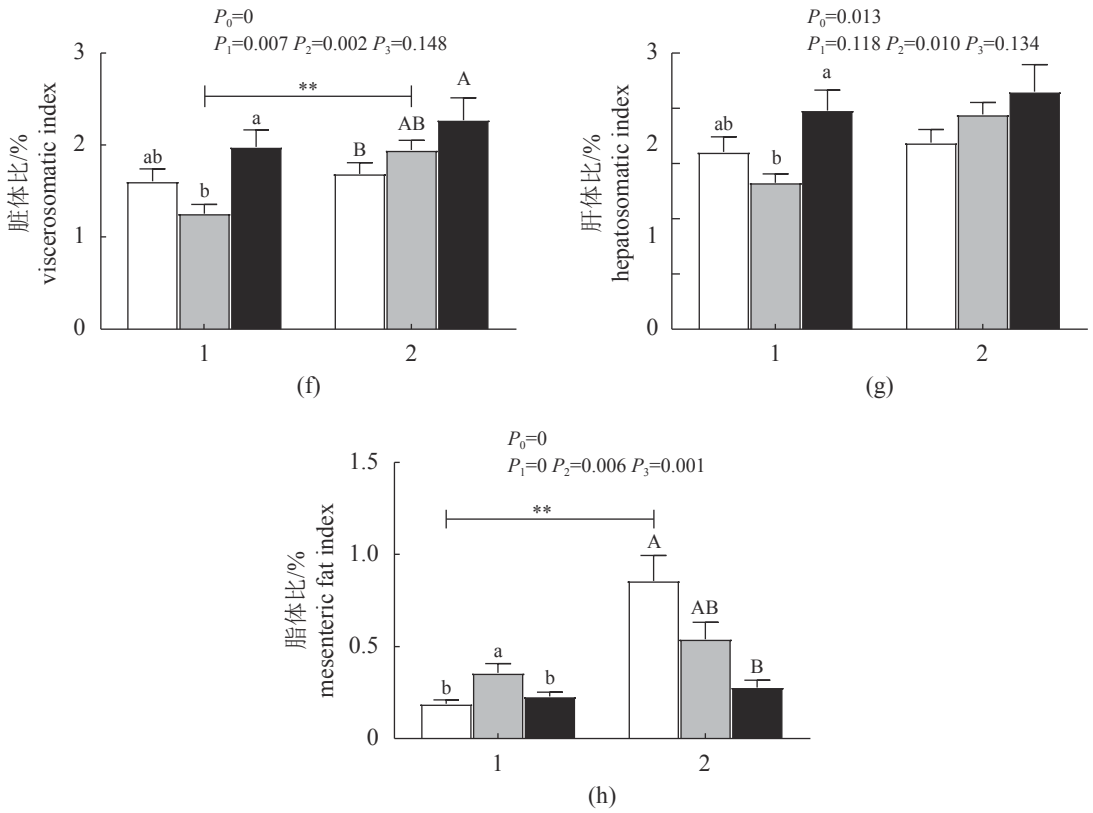


**图 1　水体盐度与饲料脂肪含量对尼罗罗非鱼生长的影响**

1. 中脂饲料, 2. 高脂饲料。不同小写字母表示脂饲料投喂下，3 种不同盐度水环境造成显著差异；不同大写字母表示高脂饲料投喂下，3 种不同盐度水环境造成显著差异；*. 同盐度水环境养殖下不同脂肪含量饲料投喂组之间差异显著 ($P$<0.05)；**. 同盐度水环境养殖下不同脂肪含量饲料投喂组之间差异极显著 ($P$<0.01)；$P_0$. 单因素方差分析结果，$P_1$. 饲料中脂肪含量对数据的影响，$P_2$. 水环境中盐度对数据的影响，$P_3$. 脂肪含量和盐度的交互作用对数据的影响，若 $P$<0.05 则有显著影响，下同

**Fig. 1　Effects of water salinity and dietary fat content on growth of *O. niloticus***

1. medium fat diet, 2. high fat diet; different lowercase letters indicate that the significant difference between three salinity levels in medium fat diet group; different capital letters indicate that the significant difference between three salinity levels in high fat diet group; *. the significant difference between different diet group at same salinity level ($P$<0.05); **. the highly significant difference between different diet group at same salinity level ($P$<0.01); $P_0$. the result of One-Way ANOVA, $P_1$. the effect of dietary fat content on data; $P_2$. the effect of salinity on data; $P_3$. effect of the interaction between fat content and salinity on the data,“$P$<0.05” mean the significant difference, the same below

了全鱼水分和肝糖原含量 (图 2-c，2-e，$P$<0.05)。

双因素方差分析显示 (图 2)，脂肪水平 ($P_1$) 影响除灰分外的所有指标 ($P_1$<0.05)，盐度水平 ($P_2$) 显著影响全鱼水分、灰分、肝糖原和肝脏甘油三酯 ($P_2$<0.05)，盐度水平和饲料脂肪含量的交互作用 ($P_3$) 显著影响全鱼总脂、灰分、肝糖原和肝脏甘油三酯的含量 ($P_3$<0.05)。以上结果显示，在不同饲料脂肪含量和水体盐度下，尼罗罗非鱼具有不同的代谢模式并且造成不同营养物质的沉积。在中脂饲料投喂下，与其他 2 个盐度处理组相比，高盐度胁迫显著降低了尼罗罗非鱼的脂肪代谢，并且使鱼体出现了脂肪沉积；高脂饲料投喂下，尼罗罗非鱼在面临高盐度胁迫时会导致糖和脂肪代谢增加，鱼体总脂和肝糖原下降，但肝脏乳酸增加。

## 2.3　水体盐度与饲料脂肪含量对血清生化指标的影响

在中脂饲料投喂下，中盐处理显著提高了尼罗罗非鱼血清乳酸含量和谷草转氨酶活性 (图 3-b，3-e，$P$<0.05)，高盐处理则使尼罗罗非鱼血糖、乳酸、甘油三酯含量显著升高 (图 3-a，3-b，3-c，$P$<0.05)。高脂饲料投喂下，与对照组比，中盐和高盐处理使尼罗罗非鱼血糖显著升高 (图 3-a，$P$<0.05)，并且高盐组尼罗罗非鱼的血清乳酸含量和谷草转氨酶活性也显著升高 (图 3-b，3-e，$P$<0.05)。

在淡水养殖条件下，与中脂饲料相比，高脂饲料显著提高尼罗罗非鱼血清甘油三酯含量 (图 3-c，$P$<0.05)；在中盐环境下，与中脂饲料组

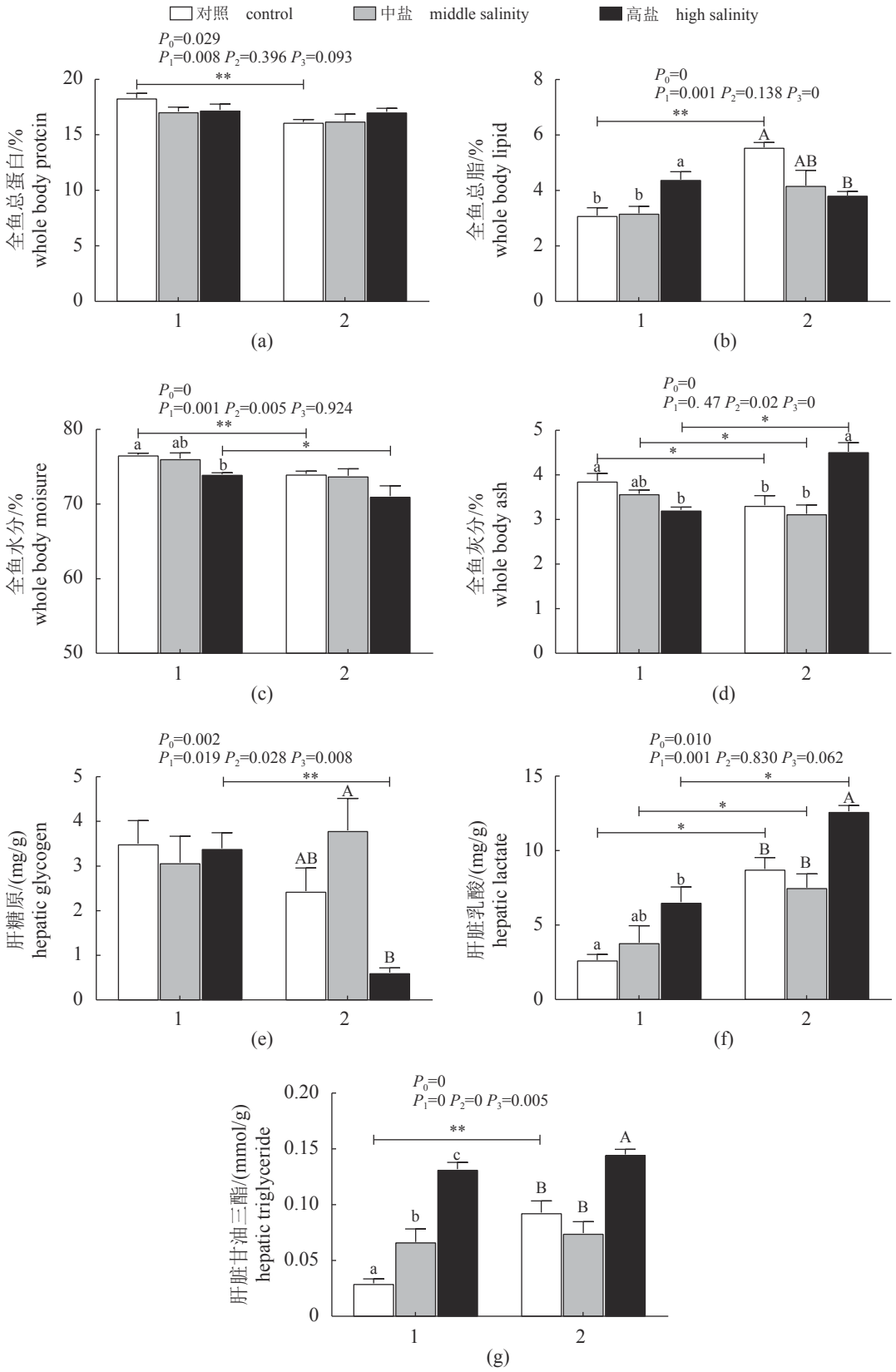


**图 2 水体盐度与饲料脂肪含量对尼罗罗非鱼体成分的影响**

**Fig. 2 Effects of water salinity and dietary fat content on body composition of *O. niloticus***

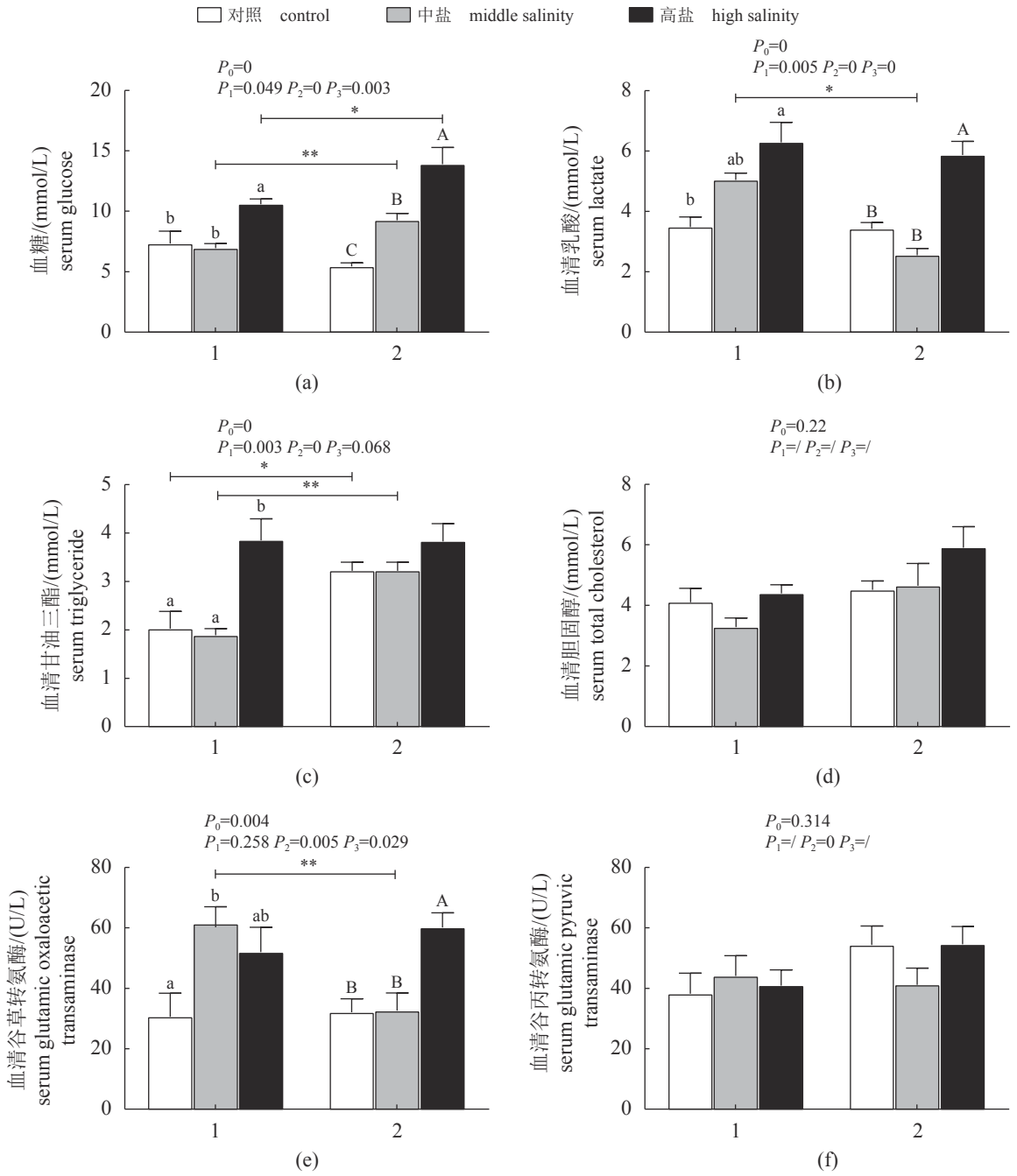


**图 3　水体盐度与饲料脂肪含量对尼罗罗非鱼血清生化的影响**

**Fig. 3　Effects of water salinity and dietary fat content on serum biochemistry of *O. niloticus***

相比，高脂饲料组尼罗罗非鱼血糖和甘油三酯含量显著提高 (图 3-a，3-c，$P$<0.05)，而血清乳酸和谷草转氯酶活性显著降低 (图 3-b，3-e，$P$<0.05)。

双因素方差分析显示，饲料脂肪 ($P_1$) 含量显著影响尼罗罗非鱼血糖、血清乳酸和甘油三酯含量 ($P_1$<0.05)，盐度水平 ($P_2$) 显著影响血糖、血清乳酸、甘油三酯含量和谷草转氨酶活性 ($P_2$<0.05)，2 种因素的交互作用 ($P_3$) 显著影响了血糖、血清乳酸含量和谷草转氨酶活性 ($P_3$<0.05) (图 3)。以上结果显示，中脂饲料投喂下的尼罗罗非鱼在面对高盐度胁迫时需要消耗大量的能量，造成糖代谢旺盛、乳酸升高；在高脂饲料投喂下，高盐度组谷草转氨酶含量显著高于对照组和中盐组，这表明高盐水环境和高脂饲料的联合作用会造成尼罗罗非鱼的肝脏损伤。

### 2.4 水体盐度与饲料脂肪含量对尼罗罗非鱼肌肉营养素沉积的影响

在中脂饲料投喂下，与对照组和高盐组相比，中盐组尼罗罗非鱼肌肉中的蛋白质含量和乳酸水平最高 (图 4-a，4-e，$P$<0.05)，而水分和糖原含量下降 (图 4-c，4-d，$P$<0.05)；在高脂饲料投喂下，3 个盐度梯度中，中盐环境下尼罗罗非鱼肌肉中的蛋白质含量最低 (图 4-a，$P$<0.05)；而高盐环境下，尼罗罗非鱼肌肉总脂肪、甘油三酯和磷脂含量显著上升 (图 4-b，4-f，4-g，$P$<0.05)。

在淡水养殖条件下，与中脂饲料相比，高脂饲料显著提高尼罗罗非鱼肌肉乳酸含量 (图 4-e，$P$<0.05)，却显著降低水分含量 (图 4-c，$P$<0.05)；中盐养殖条件下，高脂饲料组尼罗罗非鱼的肌肉糖原含量显著提高 (图 4-d，$P$<0.05)；高盐度养殖条件下，高脂饲料显著提高了尼罗罗非鱼肌肉总脂肪、乳酸、甘油三酯和磷脂含量 (图 4-b，4-e，4-g，$P$<0.05)。

双因素方差分析显示 (图 4)，饲料脂肪含量 ($P_1$) 显著影响了尼罗罗非鱼肌肉总蛋白质、总脂肪、水分和磷脂含量 ($P_1$<0.05)，盐度水平 ($P_2$) 显著影响了肌肉总脂肪、水分和磷脂含量 ($P_2$<0.05)，2 种因素的交互作用 ($P_3$) 显著影响了肌肉总蛋白质、总脂肪、乳酸和磷脂含量 ($P_3$<0.05)。由以上结果显示，盐度和饲料脂肪含量的变化都会改变鱼体肌肉营养素的富集程度。中脂中盐投喂下，有利于尼罗罗非鱼肌肉中蛋白质和乳酸的富集，盐度上升也使磷脂含量有增加的趋势，并且高脂饲料和高盐环境的协同作用会导致肌肉中富集大量脂肪。

### 2.5 水体盐度与饲料脂肪含量对尼罗罗非鱼肌肉氨基酸组成以及肉质的影响

在中脂饲料投喂和中盐环境下，尼罗罗非鱼肌肉中的鲜味氨基酸 (DAA)、呈味氨基酸 (FAA)、必需氨基酸 (EAA)、半必需氨基酸 (HEAA)、总氨基酸 (TAA) 含量均高于其余 2 个盐度组。在高脂饲料投喂下，高盐组尼罗罗非鱼肌肉中 FAA、HEAA 和 TAA 含量则高于其余 2 个盐度组 (表 2)。

在中盐养殖环境下，与中脂饲料组相比，高脂饲料组尼罗罗非鱼肌肉中的 DAA、FAA、EAA、HEAA和 TAA 的含量显著降低 ($P$<0.05)；另外，在高盐养殖环境下，与中脂饲料组相比，高脂饲料组尼罗罗非鱼肌肉中的 DAA 和 FAA 含量显著升高 ($P$<0.05)。

双因素方差分析显示 (表 3)，饲料脂肪水平显著影响了 DAA、FAA 和 TAA 含量 ($P_1$<0.05)，盐度水平显著影响了肌肉 DAA 和 EAA/TAA ($P_2$<0.05)，而二者交互作用显著影响了除 EAA/TAA 外的所有指标 ($P_3$<0.05)。由以上结果可知，在中脂饲料投喂条件下，与对照组和高盐组相比，中盐环境可以显著提高鱼肉中的氨基酸营养。在中盐环境中，相对于中脂饲料组，投喂高脂饲料会降低鱼体营养价值和风味；高盐—高脂组会使氨基酸营养价值有所回升。

在中脂饲料投喂下，与其余 2 个盐度组相比，中盐组的尼罗罗非鱼具有最高的产肉率和最低肌肉 pH(图 5-a，d，$P$<0.05)；而高盐度组的尼罗罗非鱼具有最低的产肉率和离心失水率 (图 5-a，5-b，$P$<0.05)。在高脂饲料投喂下，3 个盐度梯度中，中盐组尼罗罗非鱼肌肉 pH 最高 (图 5-d，$P$<0.05)；高脂—高盐组的尼罗罗非鱼具有最低产肉率、离心失水率和 pH (图 5-a，5-b，5-d，$P$<0.05)。

在淡水养殖条件下，相对于中脂组，高脂组尼罗罗非鱼肌肉的蒸煮损失率显著增大 (图 5-c，$P$<0.05)；在中盐养殖条件下，高脂投喂则显著提高了肌肉 pH(图 5-d，$P$<0.05)；而在高盐养殖条件下，相对于中脂组，高脂组尼罗罗非鱼的产肉率显著降低 (图 5-a，$P$<0.05)。

双因素方差分析显示，脂肪水平 ($P_1$) 的变化显著影响蒸煮损失率和肌肉 pH($P_1$<0.05)，盐度 ($P_2$) 的变化显著影响了产肉率、离心失水率和肌肉 pH($P_2$<0.05)，2 种因素的交互作用 ($P_3$) 显著影响了产肉率和肌肉 pH($P_3$<0.05)(图 5)。以上结果显示，中脂饲料投喂下，中盐组尼罗罗非鱼比对照组和高盐组具有更高的产肉率，但是中盐组肌肉的 pH 最低，而高盐度处理会降低产肉率和离心失水率；高脂饲料和高盐度处理的交互作用显著降低了产肉率、离心失水率和肌肉 pH。

## 3 讨论

### 3.1 水体盐度与饲料脂肪含量对尼罗罗非鱼生长的影响

目前，有关于水体盐度与饲料脂肪水平联合影响鱼类生理状态的报道还比较缺乏。Likongwe 等[16] 的研究结果表明，在特定温度正常饲料投喂下，尼罗罗非鱼在水体盐度为 8 时生长最快，

饲料转化效率最高。而在本研究中，中脂饲料投喂下的尼罗罗非鱼相较 0 和 16 盐度组，在水体盐度为8 时饲料系数最低，并且 8 周终末体质量最大，这与 Likongwe 等[16] 的报道一致。

高脂饲料虽然能在短期内使得鱼类获得快速生长，但是也会造成体内脂肪的沉积并造成

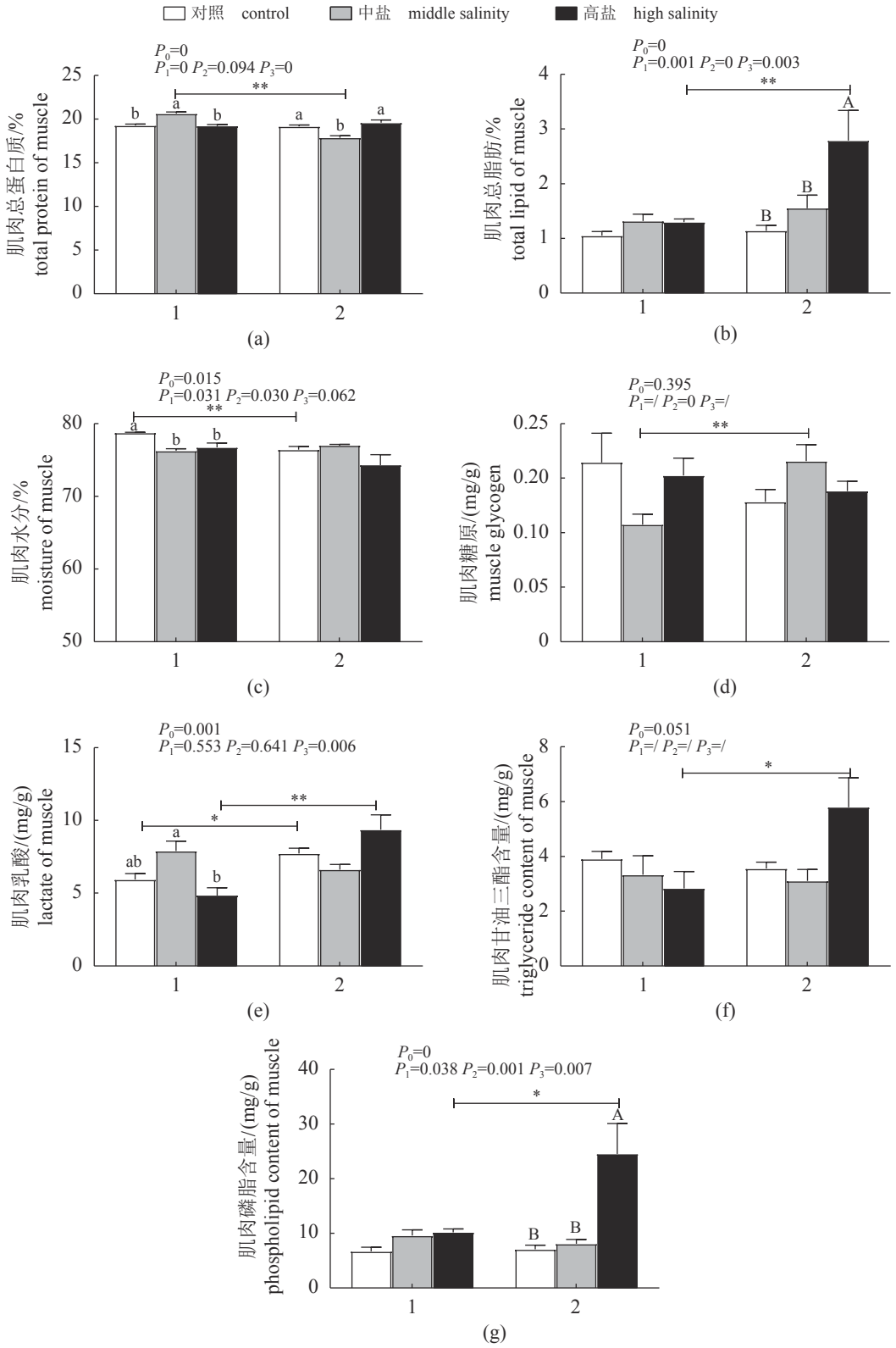


**图 4　水体盐度与饲料脂肪含量对尼罗罗非鱼肌肉营养素沉积的影响**

**Fig. 4　Effects of water salinity and dietary fat content on nutrient deposition of *O. niloticus* muscle**

表 2 投喂不同饲料下盐度对尼罗罗非鱼肌肉氨基酸组成的影响 (湿重)

Tab. 2 Effects of salinity on amino acid composition in muscle of *O. niloticus* fed with the experimental diets (wet weight)

mg/g

| 氨基酸 amino acid | 中脂饲料 medium fat diet | | | 高脂饲料 high fat diet | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 对照 control | 中盐 middle salinity | 高盐 high salinity | 对照 control | 中盐 middle salinity | 高盐 high salinity |
| 天冬氨酸 Asp△^ | 19.79±0.24$^{ab}$ | 20.89±0.23$^{a}$ | 19.19±0.39$^{b}$ | 20.41±0.23$^{AB}$ | 19.35±0.34$^{B*}$ | 20.93±0.13$^{A*}$ |
| 苏氨酸 Thr*^ | 8.56±0.09$^{ab}$ | 9.04±0.11$^{a}$ | 8.29±0.16$^{b}$ | 8.85±0.09$^{AB}$ | 8.46±0.10$^{B*}$ | 9.24±0.10$^{A*}$ |
| 丝氨酸 Ser^ | 7.58±0.10$^{ab}$ | 8.05±0.10$^{a}$ | 7.46±0.14$^{b}$ | 7.94±0.06$^{B}$ | 7.54±0.07$^{C*}$ | 8.32±0.04$^{A*}$ |
| 谷氨酸 Glu△ | 28.72±0.34$^{ab}$ | 30.73±0.35$^{a}$ | 27.35±0.51$^{b}$ | 29.88±0.33$^{AB}$ | 28.46±0.38$^{B*}$ | 30.58±0.33$^{A*}$ |
| 甘氨酸 Gly△^ | 10.87±0.22 | 11.89±0.26 | 11.82±0.25 | 11.44±0.13$^{B}$ | 11.01±0.01$^{B*}$ | 14.14±0.31$^{A*}$ |
| 丙氨酸 Ala△^ | 11.92±0.08 | 12.71±0.18 | 12.51±0.32 | 12.43±0.16$^{B}$ | 11.88±0.06$^{C*}$ | 13.68±0.08$^{A}$ |
| 半胱氨酸 Cys | 0.86±0.18 | 1.24±0.18 | 0.91±0.06 | 1.40±0.05 | 1.05±0.21 | 1.02±0.05 |
| 缬氨酸 Val* | 9.48±0.14$^{ab}$ | 9.98±0.13$^{a}$ | 9.07±0.17$^{b}$ | 9.76±0.07$^{B}$ | 9.38±0.09$^{C*}$ | 10.11±0.07$^{A*}$ |
| 蛋氨酸 Met* | 4.91±0.15 | 5.03±0.16 | 4.51±0.09 | 5.12±0.09 | 4.67±0.25 | 4.95±0.07$^{*}$ |
| 异亮氨酸 Ile* | 8.91±0.13$^{ab}$ | 9.34±0.09$^{a}$ | 8.47±0.17$^{b}$ | 9.16±0.08$^{AB}$ | 8.75±0.14$^{B*}$ | 9.42±0.08$^{A*}$ |
| 亮氨酸 Leu* | 15.54±0.21$^{ab}$ | 16.38±0.19$^{a}$ | 14.73±0.28$^{b}$ | 16.03±0.18$^{AB}$ | 15.27±0.26$^{B*}$ | 16.50±0.13$^{A*}$ |
| 酪氨酸 Tyr | 6.31±0.08$^{ab}$ | 6.67±0.07$^{a}$ | 5.99±0.12$^{b}$ | 6.53±0.06$^{A}$ | 6.21±0.07$^{B*}$ | 6.76±0.07$^{A*}$ |
| 苯丙氨酸 Phe* | 8.25±0.11$^{ab}$ | 8.65±0.11$^{a}$ | 7.85±0.15$^{b}$ | 8.48±0.11$^{AB}$ | 8.05±0.19$^{B*}$ | 8.67±0.05$^{A*}$ |
| 赖氨酸 Lys* | 18.18±0.22$^{ab}$ | 19.12±0.22$^{a}$ | 17.42±0.37$^{b}$ | 18.7±0.24$^{AB}$ | 17.83±0.32$^{B*}$ | 19.14±0.15$^{A*}$ |
| 组氨酸 His# | 5.87±0.12 | 5.71±0.15 | 5.45±0.18 | 5.49±0.11$^{B}$ | 5.39±0.02$^{B}$ | 5.92±0.03$^{A}$ |
| 精氨酸 Arg# | 11.285±0.09$^{ab}$ | 11.91±0.19$^{a}$ | 10.82±0.13$^{b}$ | 11.64±0.05$^{B}$ | 11.13±0.05$^{C*}$ | 12.12±0.12$^{A*}$ |
| DAA△ | 71.30.50±0.86$^{b}$ | 76.22±0.99$^{a}$ | 70.87±1.28$^{b}$ | 74.16±1.15$^{AB}$ | 70.69±1.32$^{B*}$ | 79.32±0.0.57$^{A*}$ |
| FAA^ | 78.87±0.96$^{b}$ | 84.28±1.09$^{a}$ | 78.33±1.42$^{ab}$ | 82.10±0.72$^{B}$ | 78.24±0.83$^{C*}$ | 87.64±0.37$^{A*}$ |
| EAA* | 73.82±0.93$^{ab}$ | 77.54±0.87$^{a}$ | 70.34±1.28$^{b}$ | 76.1±0.75$^{B}$ | 72.42±1.34$^{AB*}$ | 78.04±0.48$^{A}$ |
| HEAA# | 17.15±0.074$^{ab}$ | 17.62±0.34$^{a}$ | 16.27±0.29$^{b}$ | 17.13±0.15$^{B}$ | 16.52±0.05$^{C*}$ | 18.03±0.13$^{A}$ |
| TAA | 177.01±2.11$^{ab}$ | 187.34±2.25$^{a}$ | 171.84±3.0$^{b}$ | 183.26±1.59$^{B}$ | 174.44±2.50$^{B*}$ | 191.49±0.87$^{A}$ |
| EAA/TAA | 0.42±0.00$^{a}$ | 0.41±0.00$^{ab}$ | 0.41±0.00$^{b}$ | 0.42±0.00$^{A}$ | 0.42±0.00$^{A}$ | 0.41±0.00$^{B}$ |

注：DAA△. 鲜味氨基酸，FAA^. 呈味氨基酸，EAA*. 必需氨基酸，HEAA#. 半必需氨基酸, TAA. 总氨基酸，下同

Notes: DAA△. delicious amino acid，FAA^. flavor amino acid，EAA*. essential amino acid，HEAA#. semi-essential amino acid, TAA. total amino acids，the same below

表 3 双因素分析结果

Tab. 3 Two-Way Analysis of variance results

| 氨基酸 amino acid | 单因素方差分析 One-Way ANOVA | 双因素方差分析 Two-Way ANOVA | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 显著性(*P*值) significance (*P* value) | 脂肪含量(F) fat content (F) | | 盐度(S) salinity (S) | | 脂肪*盐度 F * S | |
| | *P* | *F* | $P_1$ | *F* | $P_2$ | *F* | $P_3$ |
| DAA | 0 | 7.442 | 0.018 | 3.916 | 0.049 | 33.063 | 0 |
| FAA | 0 | 7.73 | 0.017 | 3.592 | 0.06 | 32.782 | 0 |
| EAA | 0.001 | 4.041 | 0.067 | 0.416 | 0.669 | 21.28 | 0 |
| HEAA | 0 | 1.724 | 0.214 | 0.097 | 0.908 | 25.619 | 0 |
| TAA | 0 | 6.022 | 0.030 | 0.251 | 0.782 | 28.614 | 0 |
| EAA/TAA | 0.001 | 0.679 | 0.426 | 23.269 | 0 | 1.066 | 0.375 |

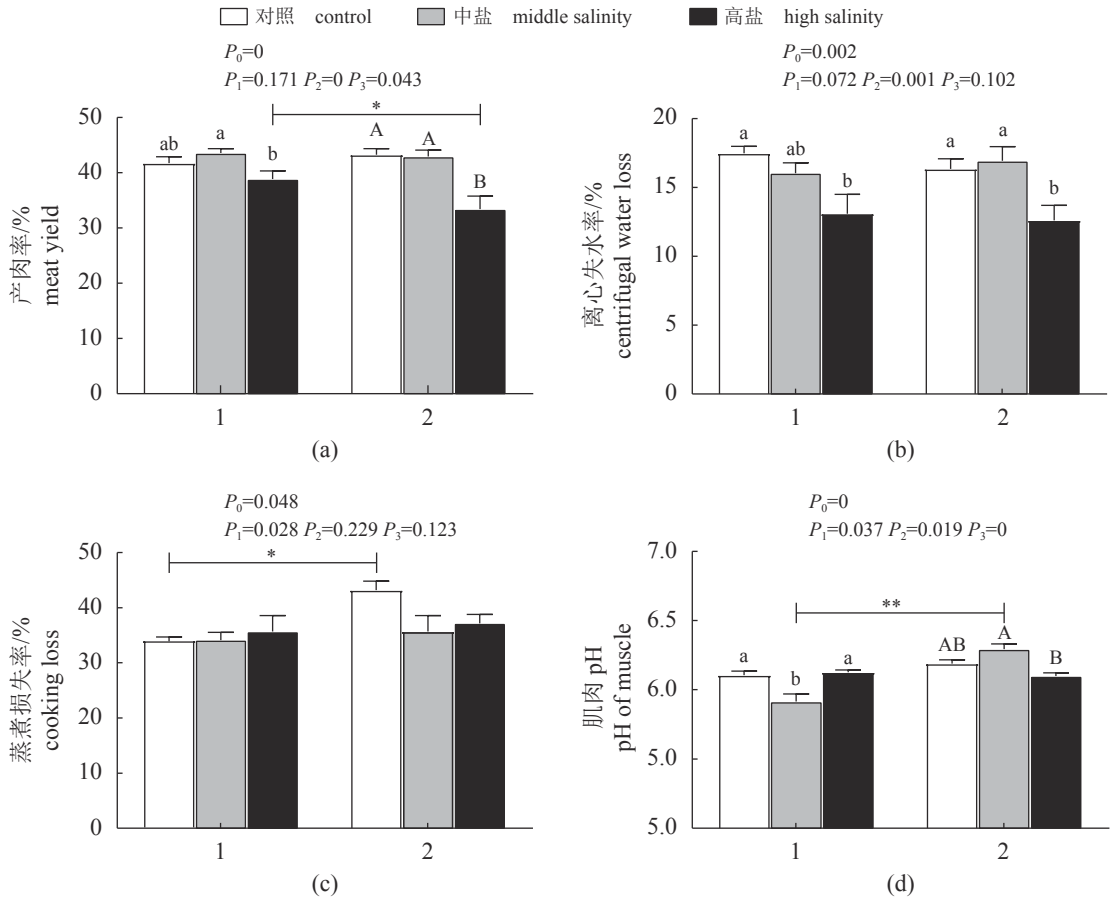


**图 5　水体盐度与饲料脂肪含量对尼罗罗非鱼肌肉品质的影响**

**Fig. 5　Effects of water salinity and dietary fat content on flesh quality of *O. niloticus* muscle**

代谢损伤[17-18]。本研究发现高脂饲料投喂下的尼罗罗非鱼随着水体盐度的上升出现饲料系数上升、生长减慢和死亡增加的现象，这说明水环境中盐度的升高加剧了高脂饲料的负面效应。有研究表明，鱼类为了维持基本生命活动必需消耗大量能量[19]，一般认为其他条件相同时，等渗点的鱼具有最低的能量消耗和最高的饲料转化效率[20]。即说明，在高盐度环境下，鱼体需要消耗更多的能量来应对恶劣环境以维持生长。这与本实验结果有类似之处，特别是在高脂饲料投喂下，尼罗罗非鱼的终末体质量随盐度升高而显著下降，并且饲料系数随盐度的升高而显著升高。以上结果显示，高脂饲料和高盐度的联合作用限制了尼罗罗非鱼的生长，高脂高盐组尤为明显。

Koskela 等[21]研究发现，正常养殖条件下高脂饲料会造成尼罗罗非鱼腹腔脂肪沉积。同样，本实验也发现淡水养殖条件下高脂饲料显著提高尼罗罗非鱼的终末体质量和脂体比。而在中盐度和高盐度水体中，高脂饲料导致实验鱼的死亡率上升。这再次表明，高盐度和高脂饲料的联合作用损害鱼体健康。以上结果显示，正常饲料投喂下，中盐度水体中的尼罗罗非鱼生长较快，在高盐水体中，高脂饲料会抑制尼罗罗非鱼生长。

### 3.2　水体盐度与饲料脂肪含量对尼罗罗非鱼体成分与代谢的影响

鱼类的血液与生长、代谢和营养素的沉积有密切联系，当鱼类代谢发生变化时，必定能在血清中反映出来[22]。因此，测定血清生化参数对于判断鱼类的生长状态和营养物质的沉积有重要意义。Bacca 等[23]指出水生动物在面临环境变化时，糖代谢是其主要的供能方式。本研究中，中脂饲料投喂的尼罗罗非鱼在面临高盐度环境时，血清和肝脏中的乳酸和甘油三酯含量上升，机体脂肪含量上升而蛋白质含量下降。研究表明，正常投喂下的尼罗罗非鱼在面临高盐度环境时，主要利用糖和蛋白质供能，但较难动用脂肪。高脂高盐组血清谷草转氨酶活性

显著升高，表明 2 种因素的联合作用造成尼罗罗非鱼肝脏损伤，不利于尼罗罗非鱼的生长。也有文献指出，脂肪的动用和消耗对于抵抗环境变化引起的机体损伤具有重要作用[24]。本研究中，高脂饲料投喂下的尼罗罗非鱼全鱼脂肪含量随着盐度增高而降低，鱼体加剧了脂肪的分解供能以应对高脂饲料和盐度环境联合作用导致的机体损伤。而高脂和高盐组的尼罗罗非鱼肝脏糖原显著下降，说明在应激条件下，糖代谢也占据重要地位。崔奕波[25]指出灰分与鱼体能量成反比，本研究中脂饲料投喂下高盐度组灰分降低正好符合全鱼脂肪含量上升的现象，并且有文献报道过多的脂肪积累会损伤养殖鱼类的免疫功能[26]，而高脂高盐组尼罗罗非鱼的鱼体灰分显著升高，这与该组实验鱼肝脏糖原和全鱼脂肪下降完全相符。因此，无论是中脂还是高脂饲料投喂下的尼罗罗非鱼，在高盐度胁迫下都会出现生长抑制的现象。

有研究指出，高脂饲料投喂下的小鼠蛋白质分解供能增加，脂肪分解代谢减弱，而脂肪的合成增加[27]。本研究中，淡水养殖下使用高脂饲料造成全鱼蛋白质含量下降而脂肪含量增加，由于脂肪的合成过程消耗大量的水分，因而也会造成鱼体水分的下降。在中盐环境下，投喂高脂饲料表现出灰分下降和肝脏甘油三酯含量上升，但肝糖原没有明显变化，表明在中盐环境下投喂高脂饲料所造成的代谢干扰相对较小。但是，在高盐环境下，高脂组肝糖原显著减少，肝脏乳酸和甘油三酯含量显著上升，这表明该处理条件下尼罗罗非鱼大量动用存储的糖原，无氧酵解活性高，在肝脏中积累脂肪并造成肝脏损伤 (血清谷草转氨酶活性上升)。通过以上结果可知，正常饲料投喂下的尼罗罗非鱼，在面对水环境盐度变化时，主要使用糖类供能，并且高盐度胁迫会导致脂肪在体内的沉积，造成一系列负面影响；而在半咸水以及咸水环境中使用高脂饲料时，将导致肝脏脂肪积累，并在高盐高脂处理组中体现出脂毒性 (氧化损伤)，限制了尼罗罗非鱼的正常生长。

### 3.3 水体盐度与饲料脂肪含量对尼罗罗非鱼肌肉营养素沉积和氨基酸组成的影响

刘贤敏等[28]发现，适宜的盐度可以降低正常饲料投喂下的奥尼罗非鱼 [*O. niloticus*(♂)×*O. aureus*(♀)] 调节渗透压所需的能量消耗，从而增加蛋白质利用效率和增高肌肉蛋白质含量。本实验中，水体盐度为 8 时，肌肉蛋白质与氨基酸含量全面上升，这符合以往的研究结论[28]。Moyson 等[29]指出在适宜条件下，养殖鱼类的剧烈活动也会急剧消耗肌肉糖原，使肌肉中乳酸沉积，并由于营养素的快速代谢消耗大量水分。在本研究中，中脂饲料投喂下的中盐组尼罗罗非鱼比其他 2 个盐度组活动更剧烈，这或许是导致肌肉糖原和水分含量降低，而乳酸升高的原因。Mottram 等[30]指出肌肉中磷脂含量对肌肉中香味物质的形成具有重要作用。在本研究中，正常饲料投喂下的尼罗罗非鱼肌肉中磷脂含量随着盐度升高而出现上升的趋势。由于磷脂是构成细胞膜流动性的重要物质，增加磷脂含量可以提高离子流通性，考虑到尼罗罗非鱼对盐度适应性比较强，因此尼罗罗非鱼肌肉磷脂含量随着水体盐度上升而提高或许是尼罗罗非鱼适应盐度的一个重要生化表型，这也符合 Daikoku 等[31]发现孔雀花鳉 (*Poecilia reticulata*) 在海水驯化过程中机体磷脂上升的结论。

高脂饲料投喂下的尼罗罗非鱼，在水体盐度为 8 时，其肌肉蛋白质与氨基酸含量低于对照组和高盐组，但糖原含量基本不变。这说明在此种情况下尼罗罗非鱼主要利用氨基酸代谢供能，糖的代谢供能作用被减弱。同时，高盐组肌肉脂肪含量显著高于其他 2 个组，表明高盐高脂组鱼无法高效利用肌肉中的脂肪供能，从而造成肌肉脂肪沉积。

本实验发现，高脂饲料组的尼罗罗非鱼比中脂组更为活跃，这与 Moyson 等[29]发现鲤 (*Cyprinus carpio*) 在营养充足的条件下活动更为剧烈，并且乳酸升高的情况类似。因此，这也可能是本实验中高脂饲料组尼罗罗非鱼肌肉中乳酸升高的原因。而 Xie 等[27]指出高脂饲料投喂会促进小鼠蛋白质代谢，尤其在肌肉组织中最为明显。这或许是本研究中，导致半盐水环境中高脂饲料处理降低尼罗罗非鱼肌肉蛋白质和所有氨基酸的原因。由以上结果可知，中脂饲料和中盐度水体联合处理下，鱼体肌肉中蛋白质以及各种氨基酸含量最高；高脂—高盐组造成肌肉脂肪显著沉积；而在半咸水中投喂高脂饲料，则会显著降低肌肉中蛋白质含量和氨基酸营养组成。这些结果表明，尼罗罗非鱼在不同饲料脂

肪含量和水体盐度下，具有不同的营养代谢和沉积模式。

### 3.4　水体盐度与饲料脂肪含量对尼罗罗非鱼肉质的影响

当前的诸多研究均发现，鱼类躯壳与内脏团的质量在鱼体中所占比例相反，而躯壳的大小直接影响经济鱼类的产肉率。如冯德庆等[32]发现，正常饲料喂养的草鱼躯壳质量比在内脏膨大的情况下显著降低。本研究结果也表明，在中脂、高脂饲料投喂下，高盐组内脏团大于淡水组和中盐组的内脏团，相应的，高盐组的产肉率也显著低于其他 2 组。此外，肌肉中乳酸含量决定肌肉中 pH 值的变化，而低 pH 又是导致失水严重的重要因素[33]。本研究中发现中脂饲料投喂下，相比于零盐组和高盐组，中盐组由于运动剧烈导致肌肉乳酸含量升高，中脂饲料投喂下尼罗罗非鱼肌肉 pH 最低，而高脂饲料投喂下尼罗罗非鱼在中盐环境中运动并不剧烈，而且渗透压调节压力小，因此肌肉中乳酸的含量最低，进一步导致肌肉 pH 值升高。李星星等[34]指出在正常饲料投喂下，盐度为 12.5 的半咸水可以显著降低奥尼罗非鱼肌肉失水率，说明适宜的盐度可以增加持水力。这符合本研究中，中脂饲料投喂下离心失水率随着盐度上升而降低的结论。尤其在高脂饲料投喂下，高盐度环境则加剧降低肌肉中的含水量，导致失水率降低。低 pH 的结果，一方面降低肌肉持水性，造成大量汁液流出；另一方面促使肌浆蛋白析出，导致肉色苍白[35]。肌肉持水性是影响肌肉总体品质的一个重要因素，较差的肌肉持水性会降低色泽和亮度[36]，导致蛋白质随水分一同流失，水分流失导致肌肉收缩，肌肉嫩度下降[37]。由以上结果可知，中脂饲料投喂下的尼罗罗非鱼在适宜盐度中生长有利于提高肌肉品质，而高盐环境下投喂高脂饲料则造成肌肉品质的下降。

## 4　结论

本研究考察了水环境中盐度因素和饲料中脂肪含量对鱼类生长、代谢和营养组成的联合效应。结果显示，在正常饲料投喂下，中盐度水体可促进尼罗罗非鱼的生长，并且降低内脏和肝脏比例，全面提高鱼体肌肉产量、氨基酸的营养价值、蛋白质含量和能够产生香味物质的磷脂含量。在淡水养殖中，高脂饲料的投喂虽然也会促进鱼体生长，但是更会造成体内过多脂肪沉积，造成代谢压力并诱导全鱼总体蛋白质下降。当高盐水体与高脂饲料联合使用时，则会明显降低尼罗罗非鱼的摄食率、生长率、成活率和出肉率，损害鱼类的健康。因此，在中脂饲料投喂下，适宜的盐度 (如 8) 可以促进尼罗罗非鱼的生长并提高肌肉品质，然而，在高盐度水体中使用高脂饲料对尼罗罗非鱼的生长与肉质则有较大的负面影响，需谨慎使用。

**参考文献：**


[1] 尤宏争, 郑艳坤, 尤广超. 不同盐度对鱼类养殖生物学的影响研究进展[J]. 河北渔业, 2013(3): 47-52.
You H Z, Zheng Y K, You G L. Research progress on culture biology of fish cultured at different salinities[J]. Hebei Fishery, 2013(3): 47-52(in Chinese).

[2] Resley M J, Webb Jr K A, Holt G J. Growth and survival of juvenile cobia, *Rachycentron canadum*, at different salinities in a recirculating aquaculture system[J]. Aquaculture, 2006, 253(1-4): 398-407.

[3] Luz R K, Martínez-Álvarez R M, De Pedro N, *et al*. Growth, food intake regulation and metabolic adaptations in goldfish (*Carassius auratus*) exposed to different salinities[J]. Aquaculture, 2008, 276(1-4): 171-178.

[4] 梁拥军, 孙向军, 史东杰, 等. 盐度对高体革鲡生长和肉质的影响[J]. 水生生物学报, 2010, 34(4): 880-884.
Liang Y J, Sun X J, Shi D J, *et al*. Effects of salinity on growth and flesh quality of *Scortum barcoo*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2010, 34(4): 880-884(in Chinese).

[5] 王艳, 胡先成, 罗颖, 等. 盐度对鲈鱼稚鱼的生长及脂肪酸组成的影响[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2007, 24(2): 62-66.
Wang Y, Hu X C, Luo Y, *et al*. Effects of salinity on growth and fatty acids composition of juvenile *Lateolabrax japonicus*[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition), 2007, 24(2): 62-66(in Chinese).

[6] Watanabe T. Lipid nutrition in fish[J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part B: Comparative Biochemistry, 1982, 73(1): 3-15.

[7] Du Z Y, Clouet P, Zheng W H, *et al*. Biochemical hepatic alterations and body lipid composition in the herbivorous grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) fed high-fat diets[J]. British Journal of Nutrition, 2006, 95(5): 905-915.

[8] Chen Q Q, Liu W B, Zhou M, *et al*. Effects of berberine on the growth and immune performance in response to ammonia stress and high-fat dietary in blunt snout bream *Megalobrama amblycephala*[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2016, 55: 165-172.

[9] 李家乐, 李思发. 中国大陆尼罗罗非鱼引进及其研究进展[J]. 水产学报, 2001, 25(1): 90-95.
Li J Y, Li S F. Introduction and research advances of *Oreochromis niloticus* in China Mainland[J]. Journal of Fisheries of China, 2001, 25(1): 90-95(in Chinese).

[10] He A Y, Ning L J, Chen L Q, *et al*. Systemic adaptation of lipid metabolism in response to low- and high-fat diet in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. Physiological Reports, 2015, 3(8): e12458.

[11] Zhang Y X, Jiang Z Y, Han S L, *et al*. Inhibition of intestinal lipases alleviates the adverse effects caused by high-fat diet in Nile tilapia[J]. Fish Physiology and Biochemistry, 2020, 46(1): 111-123.

[12] Association of Official Analytical Chemists (AOAC). Official methods of analysis of Official Analytical Chemists International [M]. 16th ed. Arlington: AOAC , 1995.

[13] Liu Y, Jiao J G, Gao S, *et al*. Dietary oils modify lipid molecules and nutritional value of fillet in Nile tilapia: a deep lipidomics analysis[J]. Food Chemistry, 2019, 277: 515-523.

[14] Sánchez-Alonso I, Haji-Maleki R, Borderias A J. Wheat fiber as a functional ingredient in restructured fish products[J]. Food Chemistry, 2007, 100(3): 1037-1043.

[15] Pastoriza L, Sampedro G, Herrera J J, *et al*. Influence of sodium chloride and modified atmosphere packaging on microbiological, chemical and sensorial properties in ice storage of slices of hake (*Merluccius merluccius*)[J]. Food Chemistry, 1998, 61(1-2): 23-28.

[16] Likongwe J S, Stecko T D, Stauffer Jr J R, *et al*. Combined effects of water temperature and salinity on growth and feed utilization of juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Linneaus)[J]. Aquaculture, 1996, 146(1-2): 37-46.

[17] Rueda-Jasso R, Conceição L E C, Dias J, *et al*. Effect of dietary non-protein energy levels on condition and oxidative status of Senegalese sole (*Solea senegalensis*) juveniles[J]. Aquaculture, 2004, 231(1-4): 417-433.

[18] Du Z Y, Clouet P, Degrace P, *et al*. Hypolipidaemic effects of fenofibrate and fasting in the herbivorous grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) fed a high-fat diet[J]. British Journal of Nutrition, 2008, 100(6): 1200-1212.

[19] Hwang P P, Lee T H, Lin L Y. Ion regulation in fish gills: recent progress in the cellular and molecular mechanisms[J]. American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology, 2011, 301(1): R28-R47.

[20] Boeuf G, Payan P. How should salinity influence fish growth?[J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part C: Toxicology & Pharmacology, 2001, 130(4): 411-423.

[21] Koskela J, Jobling M, Savolainen R. Influence of dietary fat level on feed intake, growth and fat deposition in the whitefish *Coregonus lavaretus*[J]. Aquaculture International, 1998, 6(2): 95-102.

[22] 马利, 黄峰, 吴建开, 等. 不同菜粕水平对草鱼生长、血清生化指标和毒素残留的影响[J]. 水产学报, 2005, 29(6): 798-803.
Ma L, Huang F, Wu J K, *et al*. Effects of different rapeseed meal levels on growth, serum biochemical indices and toxins residues in *Ctenoparyngodon idellus*[J]. Journal of Fisheries of China, 2005, 29(6): 798-803(in Chinese).

[23] Bacca H, Huvet A, Fabioux C, *et al*. Molecular cloning and seasonal expression of oyster glycogen phosphorylase and glycogen synthase genes[J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part B: Biochemistry and Molecular Biology, 2005, 140(4): 635-646.

[24] Lu D L, Ma Q, Wang J, *et al*. Fasting enhances cold resistance in fish through stimulating lipid catabolism and autophagy[J]. The Journal of Physiology, 2019, 597(6): 1585-1603.

[25] 崔奕波. 从灰分及氮含量计算鱼体能量含量的一个简易方法[J]. 水生生物学报, 1990, 14(4): 376-378.
Cui Y B. A simple method for the calculation of the energy content of fish samples from ash and nitrogen contents[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 1990, 14(4): 376-378(in Chinese).

[26] Jia Y D, Jing Q Q, Niu H X, *et al*. Ameliorative effect of vitamin E on hepatic oxidative stress and hypoimmunity induced by high-fat diet in turbot (*Scophthalmus maximus*)[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2017, 67: 634-642.

[27] Xie Z X, Xia S F, Qiao Y, *et al*. Effect of GABA on oxidative stress in the skeletal muscles and plasma free amino acids in mice fed high-fat diet[J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2015, 99(3): 492-500.

[28] 刘贤敏, 李星星, 冷向军, 等. 盐度对奥尼尼罗罗非鱼

和乌鳢生长及肌肉成分影响的比较研究[J]. 上海水产大学学报, 2008, 17(2): 242-246.

Liu X M, Li X X, Leng X J, *et al*. Comparative study on effect of salinities on growth and body composition of *Oreochromis niloticus*×*O. aureus* and *Channa argus*[J]. Journal of Shanghai Fisheries University, 2008, 17(2): 242-246(in Chinese).

[29] Moyson S, Liew H J, Diricx M, *et al*. The combined effect of hypoxia and nutritional status on metabolic and ionoregulatory responses of common carp (*Cyprinus carpio*)[J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Molecular & Integrative Physiology, 2015, 179: 133-143.

[30] Mottram D S, Edwards R A. The role of triglycerides and phospholipids in the aroma of cooked beef[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 1983, 34(5): 517-522.

[31] Daikoku T, Yano I, Masul M. Lipid and fatty acid compositions and their changes in the different organs and tissues of guppy, *Poecilia reticulata* on sea water adaptation[J]. Comparative Biochemistry and Physiology-Part A: Physiology, 1982, 73(2): 167-174.

[32] 冯德庆, 唐龙飞, 黄秀声, 等. 优质牧草对提高草鱼品质的研究[J]. 水利渔业, 2006, 26(2): 81-82.

Feng D Q, Tang L F, Huang X S, *et al*. Effects of high quality grass on the quality of grass carp[J]. Reservoir Fisheries, 2006, 26(2): 81-82(in Chinese).

[33] Combes S, Postollec G, Cauquil L, *et al*. Influence of cage or pen housing on carcass traits and meat quality of rabbit[J]. Animal, 2010, 4(2): 295-302.

[34] 李星星, 刘贤敏, 冷向军. 盐度对淡水鱼生长、代谢和肉质的影响[J]. 养殖与饲料, 2008(10): 47-50.

Li X X, Liu X M, Leng X J. Effects of salinity on growth, metabolism and meat quality of freshwater fish[J]. Animals Breeding and Feed, 2008(10): 47-50(in Chinese).

[35] Joo S T, Kauffman R G, Kim B C, *et al*. The relationship of sarcoplasmic and myofibrillar protein solubility to colour and water-holding capacity in porcine longissimus muscle[J]. Meat Science, 1999, 52(3): 291-297.

[36] Hughes J M, Oiseth S K, Purslow P P, *et al*. A structural approach to understanding the interactions between colour, water-holding capacity and tenderness[J]. Meat Science, 2014, 98(3): 520-532.

[37] Zhou A M, Benjakul S, Pan K, *et al*. Cryoprotective effects of trehalose and sodium lactate on tilapia (*Sarotherodon nilotica*) surimi during frozen storage[J]. Food Chemistry, 2006, 96(1): 96-103.

# Influences of water salinity and dietary fat content on growth, nutrient composition and fillet quality of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)

LÜ Hongbo , ZHANG Zhiyong , ZHANG Meiling , CHEN Liqiao , DU Zhenyu *, QIAO Fang *

(*Lab of Aquaculture Nutrition and Environmental Health*, *College of Life Sciences*, *East China Normal University*, *Shanghai* 200241, *China*)

**Abstract**: In order to study the combined effects of water salinity and dietary fat content on the growth, fillet nutrient composition and quality of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*), we designed the following experiment. Three different salinities (0, 8, 16) were set to raise *O. niloticus* [initial weight (5.0±0.2) g]. And in each salinity-group, *O. niloticus* was fed with two lipid-content diets, medium and high lipid diet respectively (MFD, 6% and HFD, 12%). After 8 weeks of breeding, the fish were sampled, and the growth, serum biochemical parameters, muscle nutritional composition and fillet quality related parameters were assayed. The results showed that, among MFD groups, the fish in medium salinity group (salinity 8) showed the highest final weight (FW), carcass ratio (CR), mesenteric fat index (MFI) and contents of total protein, amino acids and lactate in the muscle, but decreased feed conversation ratio (FCR), viscerosomatic index (VSI), hepatosomatic index (HSI) and pH of muscle, compared with the control group (salinity 0) and high salinity group (salinity 16). And compared with the control group and middle salinity group, the fish in MFD-high salinity group showed increased FCR, condition factor (CF), VSI, HSI, whole fish lipid, hepatic triglyceride (TG) and serum glucose, lactate, TG and glutamic oxaloacetic transaminase (GOT), but reduced whole fish moisture, muscle moisture, whole fish ash, meat yield (MY) and centrifugal water loss. In HFD group, with the increase of salinity, FW, survival rate and MFI were gradually decreased, and FCR, VSI, HIS and CF were increased. In HFD group, the fish in medium salinity group showed reduced muscle total protein and amino acid content. HFD-high salinity cultured fish showed increased whole fish ash, hepatic TG, serum glucose, GOT, muscle total protein, muscle TG and PL content, and decreased whole body lipid, hepatic glycogen, MY, centrifugal water loss, pH. However, either in freshwater or saltwater, the fish fed with HFD showed higher fat accumulation and muscle lactic acid content, but lower survival rate and MY, compared with MFD. Particularly in saltwater, the HFD fed fish showed significantly higher fat accumulation and muscle lactic acid content, but lower survival rate, FCR and MY. These results showed that suitable salinity (e.g. 8) of aquaculture water environment can improve the growth and flesh quality of *O. niloticus*, but the combination of HFD and high water salinity had negative effect on growth and flesh quality of *O. niloticus*.

**Key words**: *Oreochromis niloticus*; salinity; dietary lipid content; growth; nutritional composition; flesh quality

**Corresponding authors**: DU Zhenyu. E-mail: zydu@bio.ecnu.edu.cn;
QIAO Fang. E-mail: fqiao@bio.ecnu.edu.cn

**Funding projects**: National Key R & D Program of China (2018YFD0900400)