

DOI: 10.11964/jfc.20240514526

# 越冬期鳊生长、消化代谢、抗氧化及免疫能力的动态变化



于俊琦<sup>1</sup>, 卢桦<sup>1</sup>, 陈琪琪<sup>1</sup>, 王文洁<sup>1</sup>, 陈雨霜<sup>1</sup>, 周达<sup>1</sup>,  
李勇<sup>2</sup>, 罗浩<sup>2</sup>, 翟旭亮<sup>3</sup>, 薛洋<sup>3</sup>, 罗金强<sup>4</sup>, 陈拥军<sup>1</sup>,  
赵敏<sup>2\*</sup>, 罗莉<sup>1\*</sup>

1. 西南大学水产学院, 西部(重庆)科学城种质创制大科学中心, 淡水鱼类资源与生殖发育教育部重点实验室, 重庆 400715; 2. 新希望六和股份有限公司, 四川成都 610023; 3. 重庆市水产技术推广总站, 重庆 400700; 4. 重庆市潼南区农业科技推广中心, 重庆 402660

## 摘要:

**【目的】**探究越冬期鳊生长、消化代谢、抗氧化和免疫能力的生理动态变化。

**【方法】**选取体重为(107.63±0.48)g的鳊240尾,分为生长组和取样组,每组4个重复,每个重复30尾,2天1次表观饱食投喂饲料养殖112d。其间水温经历了由14.5℃到7.5℃的降温期(0~6周)和由7.5℃到14.5℃的升温期(6~16周),设置0、2、4、6、8、12和16周共7个取样时间点。

**【结果】**鳊增重率、特定生长率和摄食率逐渐下降,在6周降至最低后逐渐上升,其中增重率和摄食率16周较6周分别提高983.20%和265.22%,饲料系数6周显著上升后下降。肥满度、脏体比、肝体比均在6周显著下降后上升。胃质子泵(H<sup>+</sup>-K<sup>+</sup>-ATP酶)、肠胰蛋白酶、淀粉酶活性在6周显著下降后上升。肝脏总抗氧化能力、超氧化物歧化酶活性在6周显著下降,丙二醛含量显著增加。血浆酸性磷酸酶活性、免疫球蛋白M含量,脾脏免疫球蛋白M含量显著下降后上升。肝脏结构在8周时开始出现部分细胞核偏移和空泡变性,16周时鳊肝细胞形态不规则,细胞间界限模糊,空泡增多,细胞核消失甚至溶解。肠道结构在8周较0周时肠绒毛稀疏且不规则,16周肠道绒毛发育情况优于0周和8周。

**【结论】**越冬前期鳊消化、抗氧化及免疫能力减弱,越冬后期鱼体重增加明显,而肝脏结构功能受损较严重。本研究可为越冬期鳊投喂养殖管理提供理论依据,促进鳊养殖产业高质量发展。

**关键词:**鳊; 低水温; 越冬期; 抗氧化; 免疫能力; 消化代谢; 生理变化

鱼类作为变温动物,环境温度对其摄食、生长、免疫能力及能量代谢等产生显著影响<sup>[1-2]</sup>。在养殖生产过程中,越冬对鱼类来说是一种自然挑战,其本质是长期缺乏食物和低温的双重压力,鱼体为应对环境压力而做出的一系列适应性变化,如负增长、消化、抗氧化及免疫能力下降<sup>[3-5]</sup>。

第一作者: 于俊琦, 从事水产动物营养与饲料研究, E-mail: 1062773230@qq.com



通信作者: 赵敏, 从事水产动物营养与饲料研究, E-mail: zhaomin4@newhope.cn;  
罗莉, 从事水产动物营养与饲料研究, E-mail: luoli1972@163.com



资助项目: 新希望六和股份有限公司项目; 重庆市生态渔业产业技术体系项目; 重庆市水产科技创新联盟项目(CQFTIU2022-04); 重庆市潼南区区级科研项目(TK-2024-47)

收稿日期: 2024-05-20  
修回日期: 2024-08-16

文章编号:  
1000-0615(2025)05-059610-11  
中图分类号: S 965.199  
文献标志码: A

作者声明本文无利益冲突

©《水产学报》编辑部(CC BY-NC-ND 4.0)  
Copyright © Editorial Office of Journal of Fisheries of China (CC BY-NC-ND 4.0)



鳊 (*Siniperca chuatsi*) 俗称桂花鱼, 具有肉质细嫩、营养丰富、无肌间刺、蛋白质含量高优点, 2023 年鳊全国养殖产量达 47.76 万 t。我国鳊冬季养殖过程中会经历不同时长低水温期, 传统养殖模式一般投喂饵料鱼越冬, 但存在摄食不足或过量, 导致肝脏变白、腹脂过多, 越冬后出现“大肚腩”等缺点, 而饲料养殖使其能在冬季可控投喂。本课题组前期研究发现, 在每天近饱食投喂 1 次条件下, 配合饲料相较于饵料鱼对鳊生长及肌肉品质方面更有优势<sup>[6]</sup>, 同时对低水温下鳊短期 (15 d) 饥饿和摄食配合饲料的生理状态进行比较, 发现摄食配合饲料可以使鱼体重上升, 饥饿则会使鱼体重、消化及免疫能力下降<sup>[7]</sup>。关于整个越冬期饲料鳊生理状态变化未见相关研究。

本研究以翘嘴鳊为对象, 在自然温度变化下开展为期 16 周的饲料养殖实验, 探讨越冬期鳊生长、消化代谢、抗氧化及免疫能力的动态变化, 明确降温和升温期鳊的生理适应性, 为鳊越冬管理提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 实验饲料

以鱼粉、鸡肉粉等为蛋白源, 以鱼油、大豆油为脂肪源, 实验基础饲料配方: 秘鲁鱼粉 40%、鸡肉粉 18%、大豆浓缩蛋白 11%、谷朊粉 6%、酶解鱼溶浆 (湿) 3%、木薯淀粉 9%、玉米 3.70%、鱼油 2%、大豆油 2%、磷酸二氢钙 2%、胆汁酸 (20%) 0.05%、矿物质预混料 0.65%、维生素预混料 0.60%、氯化胆碱 (50%) 0.50%、微晶纤维素 1.50%; 主要营养成分: 水分 12.93%, 干物质基础的粗蛋白 57.83%、粗脂肪 11.30%、粗灰分 13.82%。实验原料购于重庆新希望饲料有限公司, 粉碎后过 60 目筛, 混合机混匀后用制粒机 (邢台市裕工科技开发有限公司, DGP40-C 型) 制成直径 4.0 mm 左右的条形膨化饲料, 冷却后低温晾干, 再用双层塑料袋包装并封口, 置于 -20 °C 冰柜中保存备用。

### 1.2 实验鱼及饲养管理

实验所需 300 尾鳊 (翘嘴鳊) 购于重庆市潼南区兴水渔场, 用 1.0% 的 NaCl 溶液浸泡消毒后, 置于 2 个 5.0 m<sup>3</sup> 的大养殖缸内暂养 14 d, 选取体质健康, 初始体重为 (107.33±0.48) g 的

鳊用于实验。实验设计生长组和取样组共 2 组, 每组 4 个重复, 每个重复 30 尾, 共计 240 尾。取样组分别在 2020 年 12 月 2 日 (14.5 °C)、12 月 16 日 (11.5 °C)、12 月 30 日 (8.0 °C)、2021 年 1 月 13 日 (7.5 °C)、1 月 27 日 (8.5 °C)、2 月 24 日 (14.0 °C)、3 月 24 日 (14.5 °C) 取样, 测定形态学和相关理化指标。生长组用于称重计算生长性能, 称重时间点与取样组保持一致, 养殖时长共计 112 d, 饲养于西南大学水产学院室内养殖系统 8 个养殖缸 (500 L), 其间水温经历了由 14.5 °C 到 7.5 °C 的降温期 (0~6 周) 和由 7.5 °C 到 14.5 °C 的升温期 (6~16 周)。养殖期间每 2 天换水 50%, 每 2 天饱食投喂 1 次。饲养期间, 鳊存活率 100%, 无疾病发生, 光照周期为 12 L : 12 D, 溶解氧 ≥ 6.0 mg/L, 氨氮含量 ≤ 0.50 mg/L, 亚硝酸盐含量 ≤ 0.10 mg/L, pH 6.8~7.2。每日记录自然条件下水温情况, 各取样点水温见图 1。

### 1.3 样品采集

取样组每次在取样时间点每个重复随机选取 2 尾鳊用于全鱼常规成分分析, 另随机选取 2 尾鳊, MS-222 (100 mg/L) 麻醉后拭干鱼体表面水分, 测量体重、体高和体长。然后用肝素钠处理过的 1.0 mL 一次性无菌注射器在鳊尾静脉处取血转入 1.5 mL EP 管, 离心 (4000 r/min, 10 min) 后取血浆上清液转到另一只 1.5 mL EP 管后放入液氮罐中速冻, 之后放入 -80 °C 冰箱内保存。将鳊放置冰盘上解剖, 取出内脏团后称重, 分离出肝脏、脾脏、肾脏、胃、和肠道称重, 分别取 1.0 cm<sup>3</sup> 左右组织块存于 1.5 mL EP 管中, 经液氮速冻后于 -80 °C 冰箱内保存, 用于酶活性的测定。再取 1.0 cm 左右中肠和 1.0 cm<sup>3</sup> 左右肝脏于 4% 多聚甲醛中固定, 用于组织切片的制作。生长组仅称重, 称重时间点与取样组保持一致。实验过程中操作人员严格遵守实验动物伦理规范, 并按照西南大学实验动物福利伦理审查委员会制定的规章制度执行。

### 1.4 指标测定

养殖实验结束后, 称量每缸鱼体重, 计算生长及形体指标:

$$\text{增重率(WGR, \%)} = (W_t - W_0) / W_0 \times 100\%;$$

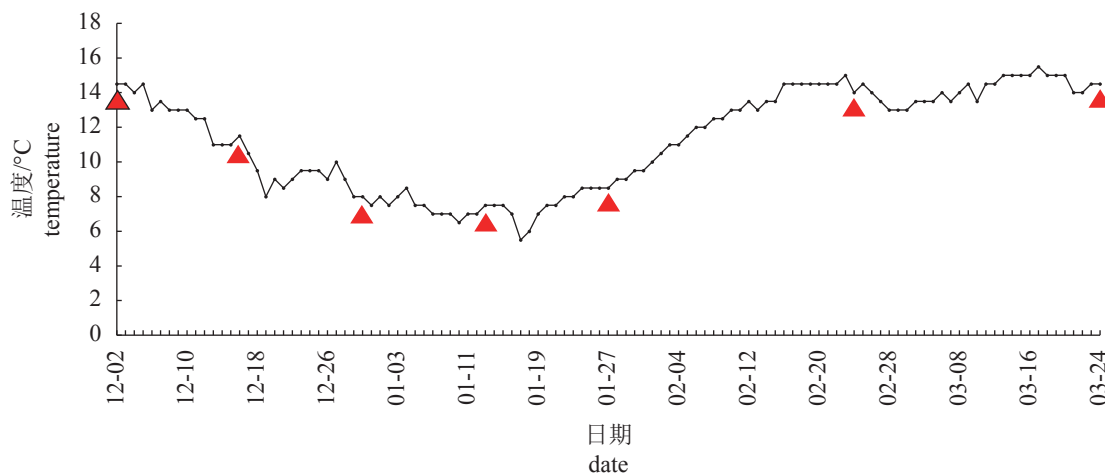


图 1 取样点温度

红色三角形为越冬期间取样时间点。

Fig. 1 Water temperature at sampling point

The red triangle is the sampling time point during the winter.

特定生长率(SGR,%/d) =  $(\ln W_t - \ln W_0) / t \times 100\%$ ;

摄食率(FR,%/d) =  $F / [(W_0 + W_t) / 2 \times d] \times 100\%$

饲料系数(FCR) =  $F / (W_t - W_0)$ ;

脏体比(VSI,%) =  $W_v / W_t \times 100\%$ ;

肝体比(HSI,%) =  $W_l / W_t \times 100\%$ ;

肥满度(CF, g/cm<sup>3</sup>) =  $W_l / L^3 \times 100$

式中,  $W_0$  为上一次取样鱼体尾均重 (g);  $W_t$  为取样时鱼体尾均重 (g);  $F$  为尾均干物质摄食量 (g);  $W_l$  为肝脏重量 (g);  $W_v$  为内脏团重 (g);  $L$  为鱼体长 (cm)。

**肌肉和全鱼常规营养成分** 水分含量测定采用 105 °C 烘箱干燥法 (GB/T 6435—2006), 粗蛋白测定采用凯氏半微量蒸馏定氮法 (GB/T 6432—1994), 粗脂肪测定采用索氏抽提法 (GB/T 6433—1994), 粗灰分采用 550 °C 灼烧法 (GB/T 6438—1992)。

**血浆生化指标测定** 谷丙转氨酶 (ALT)、谷草转氨酶 (AST)、碱性磷酸酶 (AKP)、总胆固醇 (T-CHO)、高密度脂蛋白胆固醇 (HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇 (LDL-C) 均采用南京建成生物工程研究所的试剂盒进行测定。

**消化指标测定** 胃蛋白酶、胃 H<sup>+</sup>-K<sup>+</sup>-ATP 酶、胰蛋白酶、脂肪酶和淀粉酶均采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒测定。

**抗氧化指标测定** 总抗氧化能力 (T-AOC)、总超氧化物歧化酶 (T-SOD) 和丙二醛 (MDA) 均采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒进行测定。

**免疫指标测定** 溶菌酶 (LZM) 采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒进行测定、免疫球蛋白 M (IgM) 含量采用上海优选生物科技有限公司 Elisa 试剂盒进行测定。

**肝脏和肠道石蜡组织切片** 组织经 4% 多聚甲醛固定, 依次于 70%、80%、90%、95%、100% 乙醇中脱水, 后置于二甲苯中透明, 用低熔点的石蜡包埋, 使用 Leica UC7 RT 切片机匀速切成厚度为 4 μm 的切片, 在载玻片上展片, H.E 染色, 中性树胶封片。

## 1.5 数据分析

实验数据采用 SPSS 22.0 软件进行方差齐性检验和单因素方差分析 (One-Way ANOVA), 用 Tukey 氏多重比较分析组间差异显著性, 显著水平为  $P < 0.05$ 。数据用平均值 ± 标准差 (mean ± SD) 表示。

## 2 结果

### 2.1 越冬期鳊生长性能指标

降温期: 体重 (BW)、WGR、SGR 在 6 周时降至最低 ( $P < 0.05$ ), 而 FCR 从 2 周的 1.32 升至 6 周的 3.83 ( $P < 0.05$ )。升温期: BW、WGR、

SGR 和 FR 显著上升 ( $P<0.05$ ), 在 16 周时 WGR 和 FR 较 2 周分别提高 645.15% 和 147.06%, FCR 从 6 周的 3.83 下降至 16 周的 1.61 (图 2)。

## 2.2 越冬期鳊形态学及体组成指标

降温期: 6 周时 CF、VSI、HSI 较 2 周分别下降 14.53%、25.74%、36.61%, 其中 CF、VSI 在 6 周时降至最低。升温期: 12 周时 CF、VSI、HSI 显著上升 ( $P<0.05$ )。全鱼水分随着越冬时间的延长先显著上升后下降 ( $P<0.05$ ), 粗脂肪则显著下降后上升 ( $P<0.05$ ), 粗蛋白前期相对稳定, 8 周后逐渐上升 (表 1)。

## 2.3 越冬期鳊胃肠消化能力指标

随着越冬时间的延长, 胃蛋白酶、胃  $H^+K^+$ -ATP 酶 (质子泵)、肠胰蛋白酶、淀粉酶活性先显著下降后逐渐上升 ( $P<0.05$ ), 其中肠胰蛋白酶和脂肪酶活性 16 周时大于 0 周, 肠道和胃

的消化酶活性受到不同程度的影响 (图 3)。

## 2.4 越冬期鳊脂质代谢部分指标

降温期: LDL-C 含量无显著变化 ( $P>0.05$ ); HDL-C 随着温度的降低而显著上升 ( $P<0.05$ ), T-CHO 则显著下降 ( $P<0.05$ )。升温期: LDL-C、T-CHO 含量显著上升, HDL-C 含量在 12 周时无显著变化, 16 周时显著上升 ( $P<0.05$ ) (表 2)。

## 2.5 越冬期鳊抗氧化及肝功能指标

肝脏中 T-AOC、T-SOD 活性随着越冬时间的延长呈下降趋势 ( $P<0.05$ )。血浆和肝脏 MDA 越冬期间一直上升并在 16 周时上升至最大值 ( $P<0.05$ )。ALT 活性整体呈上升趋势 ( $P>0.05$ ); AST 活性越冬期间显著上升 ( $P<0.05$ ) (图 4)。

## 2.6 越冬期鳊免疫能力部分指标

LZM、AKP、ACP 活性均表现为先下降后上升的趋势, IgM 含量在不同组织中表现不同。

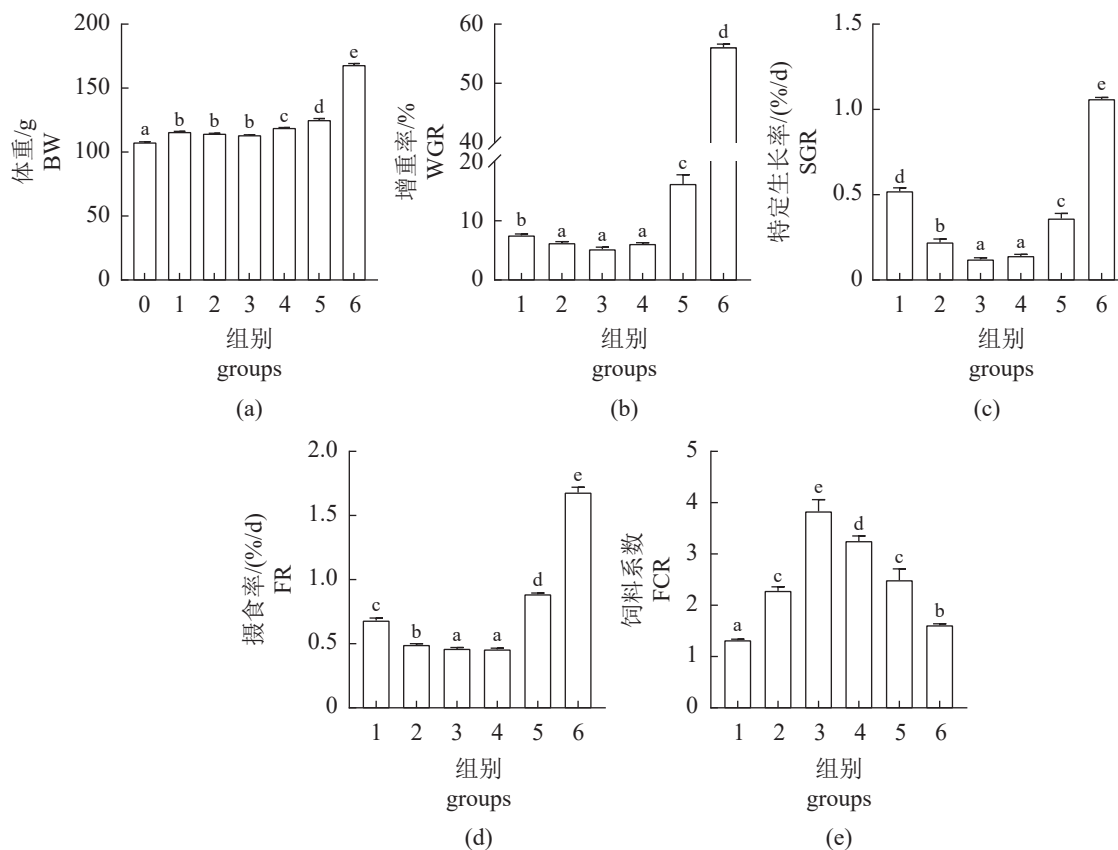


图 2 越冬期鳊生长性能指标

字母不同表示同一时间各实验组之间存在显著差异 ( $P<0.05$ ), 0. 0 周, 1. 2 周, 2. 4 周, 3. 6 周, 4. 8 周, 5. 12 周, 6. 16 周, 下同。

Fig. 2 Growth performance index of *S. chuatsi* during overwintering period

Values with the different letters mean significantly difference at the same time ( $P<0.05$ ), 0. 0-week, 1. 2-week, 2. 4-week, 3. 6-week, 4. 8-week, 5. 12-week, 6. 16-week, the same below.

表 1 越冬期鳊形态学及体组成指标

**Tab. 1 Morphology and body composition index of *S. chuatsi* during overwintering period**

项目 item	组别 group						
	0周	2周	4周	6周	8周	12周	16周
<b>形态学指标 morphological index</b>							
肥满度/(g/cm <sup>3</sup> ) CF	2.34±0.20 <sup>b</sup>	2.08±0.23 <sup>ab</sup>	2.05±0.22 <sup>ab</sup>	2.00±0.08 <sup>a</sup>	2.08±0.11 <sup>ab</sup>	2.82±0.23 <sup>c</sup>	2.65±0.22 <sup>c</sup>
体长/体高 body length/body height	2.68±0.25 <sup>a</sup>	2.83±0.15 <sup>a</sup>	3.26±0.26 <sup>b</sup>	3.08±0.06 <sup>b</sup>	3.06±0.11 <sup>b</sup>	2.65±0.11 <sup>a</sup>	2.73±0.26 <sup>a</sup>
脏体比/% VSI	8.47±0.79 <sup>d</sup>	6.58±0.78 <sup>ab</sup>	6.55±0.63 <sup>ab</sup>	6.29±0.50 <sup>a</sup>	6.25±0.35 <sup>a</sup>	7.74±0.47 <sup>cd</sup>	7.31±0.88 <sup>bc</sup>
肝体比/% HSI	1.83±0.29 <sup>b</sup>	1.22±0.15 <sup>a</sup>	1.25±0.24 <sup>a</sup>	1.16±0.41 <sup>a</sup>	1.22±0.14 <sup>a</sup>	1.79±0.22 <sup>b</sup>	1.95±0.46 <sup>b</sup>
<b>体营养组成(全鱼鲜样基础)/% body nutrients composition (whole fish sample basis)</b>							
水分 moisture	72.42±0.11 <sup>bcd</sup>	71.30±0.57 <sup>abc</sup>	72.93±0.53 <sup>cde</sup>	74.17±0.20 <sup>e</sup>	73.34±0.64 <sup>de</sup>	71.07±0.95 <sup>ab</sup>	70.32±0.32 <sup>a</sup>
粗脂肪 crude lipid	5.42±0.28 <sup>d</sup>	4.84±0.35 <sup>e</sup>	4.00±0.24 <sup>a</sup>	3.45±0.18 <sup>a</sup>	3.50±0.12 <sup>a</sup>	4.74±0.11 <sup>c</sup>	5.27±0.29 <sup>d</sup>
粗蛋白 crude protein	17.34±0.06 <sup>a</sup>	17.98±0.06 <sup>b</sup>	17.85±0.01 <sup>b</sup>	17.21±0.25 <sup>a</sup>	17.31±0.50 <sup>a</sup>	18.78±0.12 <sup>c</sup>	19.18±0.06 <sup>c</sup>
粗灰分 crude ash	4.85±0.19 <sup>a</sup>	4.93±0.17 <sup>a</sup>	5.86±0.18 <sup>b</sup>	5.23±0.14 <sup>c</sup>	5.57±0.08 <sup>c</sup>	5.70±0.09 <sup>c</sup>	5.72±0.06 <sup>c</sup>

注: 同列不同字母表示差异显著(P<0.05), 下同。

Notes: Values with the different letters mean significantly difference at the same time (P<0.05), the same below.

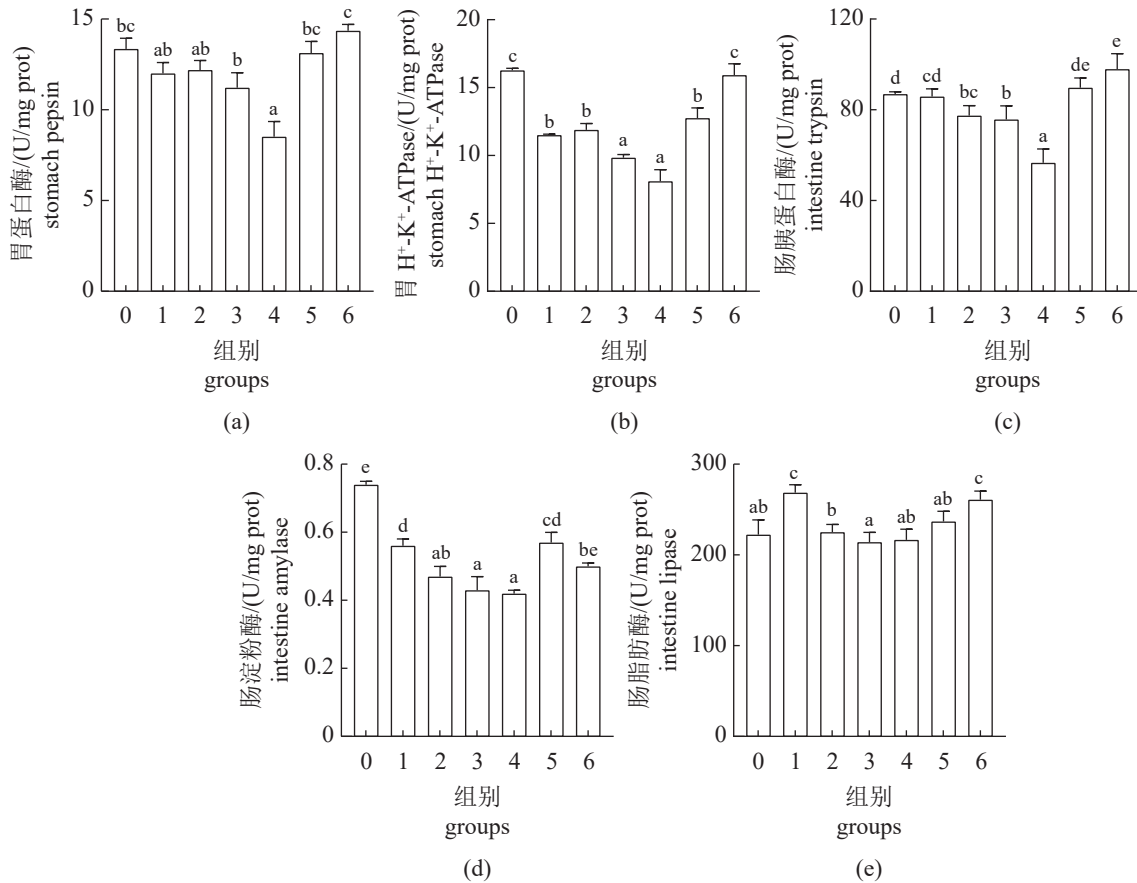


图 3 越冬期鳊胃肠消化能力指标

Fig. 3 Index of gastrointestinal digestive ability of *S. chuatsi* during overwintering period

表 2 越冬期鳊脂质代谢部分指标

项目 item		组别 group						
		0周	2周	4周	6周	8周	12周	16周
低密度脂蛋白胆固醇	LDL-C	5.68±0.16 <sup>b</sup>	5.64±0.25 <sup>b</sup>	4.67±0.25 <sup>b</sup>	4.25±0.17 <sup>b</sup>	3.64±0.33 <sup>a</sup>	11.24±0.90 <sup>d</sup>	13.97±1.70 <sup>e</sup>
高密度脂蛋白胆固醇	HDL-C	1.68±0.13 <sup>a</sup>	2.70±0.06 <sup>b</sup>	3.89±0.24 <sup>c</sup>	4.21±0.05 <sup>c</sup>	4.26±0.07 <sup>c</sup>	4.18±0.47 <sup>c</sup>	4.92±0.10 <sup>d</sup>
总胆固醇	T-CHO	11.93±0.20 <sup>c</sup>	11.34±0.56 <sup>c</sup>	10.06±1.14 <sup>bc</sup>	8.78±0.84 <sup>ab</sup>	7.01±0.26 <sup>a</sup>	21.04±1.58 <sup>d</sup>	22.90±1.95 <sup>d</sup>

降温期: LZM、AKP 活性和肾脏 IgM 含量均无显著变化 ( $P>0.05$ ), ACP、血浆 IgM、脾脏 IgM 均随着温度降低显著下降 ( $P<0.05$ )。升温期: LZM、AKP、ACP 活性均显著上升 ( $P<0.05$ ) (图 5)。

### 2.7 越冬期鳊肠道和肝脏组织结构

0 周鳊肝细胞排列整齐、密集, 细胞边界清晰, 8 周组鳊出现部分细胞核偏移、空泡变性和轻微水肿。16 周时鳊肝细胞形态不规则, 排列紊乱, 细胞间界限模糊, 空泡增多, 部分细胞核消失甚至溶解 (图版 I)。

16 周的肠绒毛发育情况优于 0 周和 8 周,

而且纹状缘形态规则, 上皮细胞中分布有相对较多的杯状细胞, 清晰可见。8 周的肠管变小, 肠绒毛排列稀疏且不规则, 纹状缘萎缩退化严重 (图版 II)。

## 3 讨论

### 3.1 越冬期鳊生长性能、形态学指标及体组成的适应性变化

鱼类作为变温动物, 环境温度的变化也会引起鱼体体温变化, 温度作为控制因子, 主要对鱼类代谢反应速率起控制作用, 从而成为影

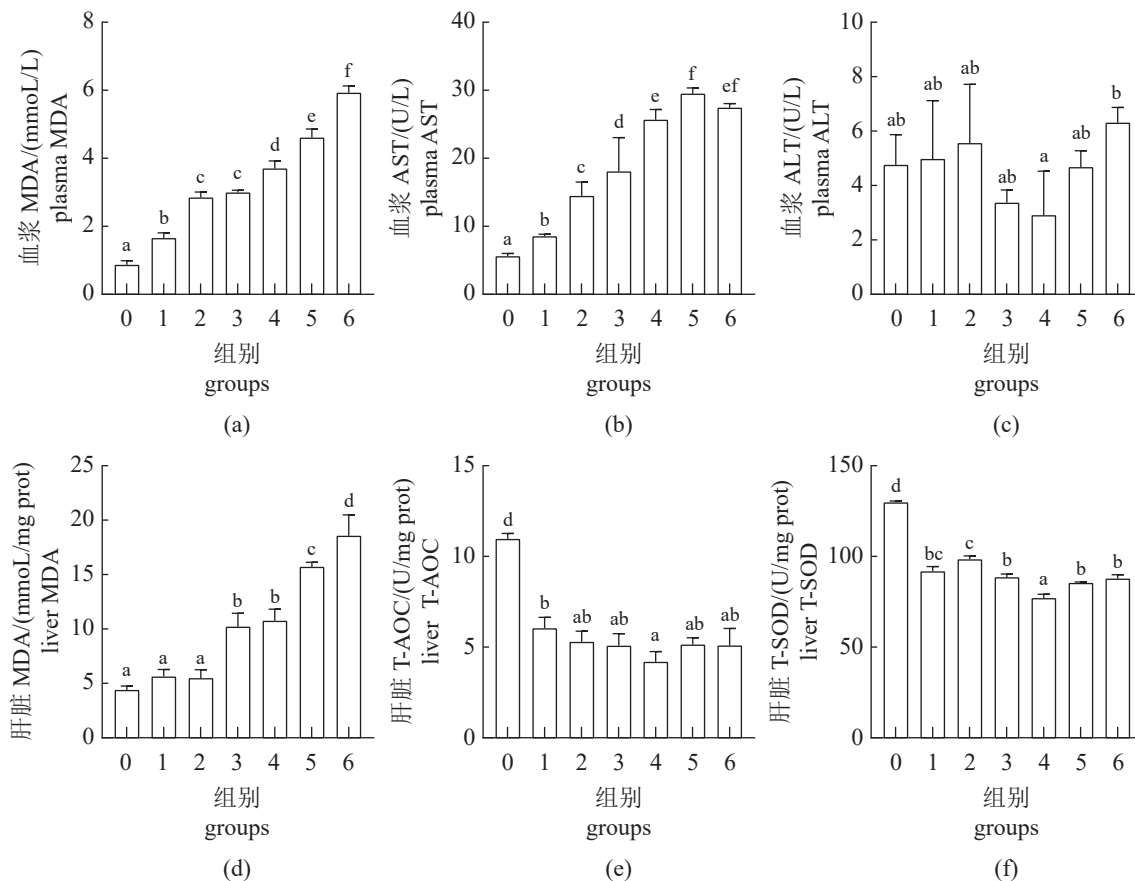


图 4 越冬期鳊抗氧化及肝功能指标

Fig. 4 Antioxidant and liver function indexes of *S. chuatsi* during overwintering period

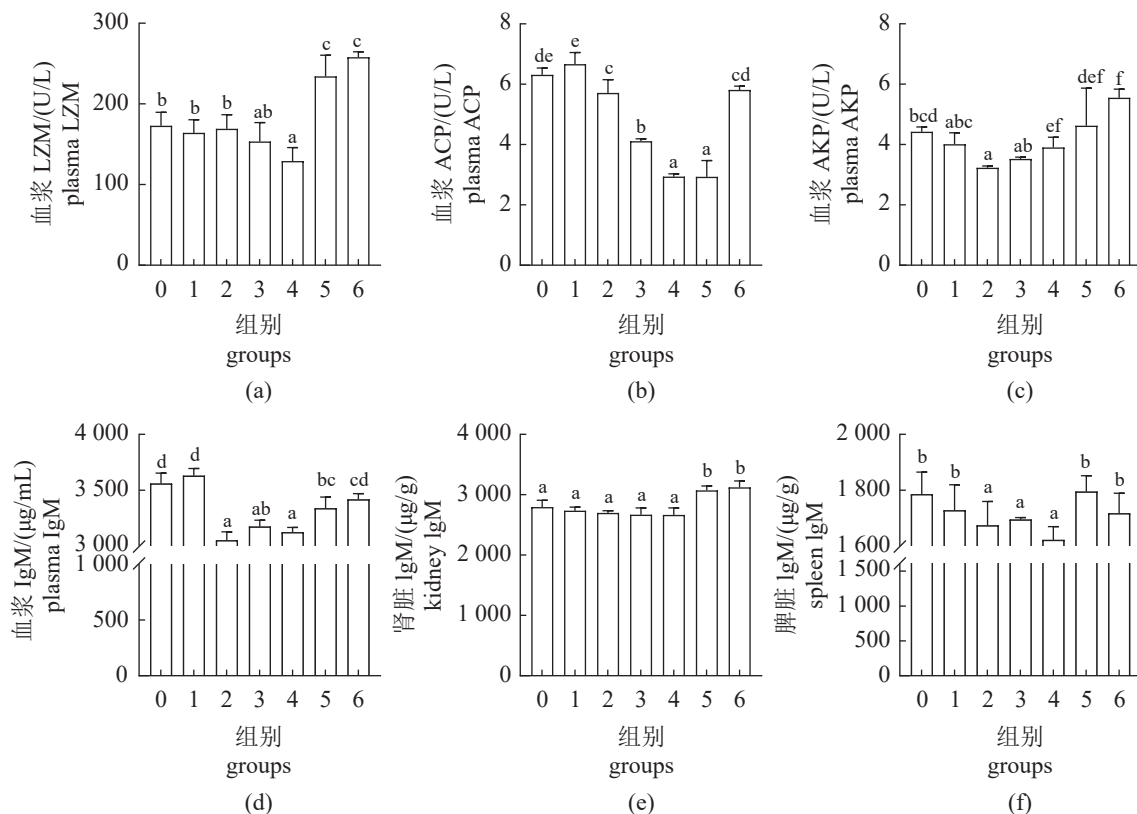
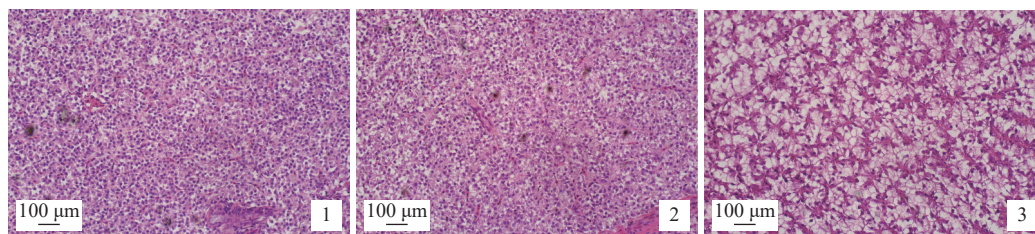


图 5 越冬期鳊免疫能力部分指标

Fig. 5 Partial indexes of immune ability of *S. chuatsi* during overwintering period



图版 I 越冬期鳊肝脏形态结构

1. 0周肝脏 (200×), 2. 8周肝脏 (200×), 3. 16周肝脏 (200×).

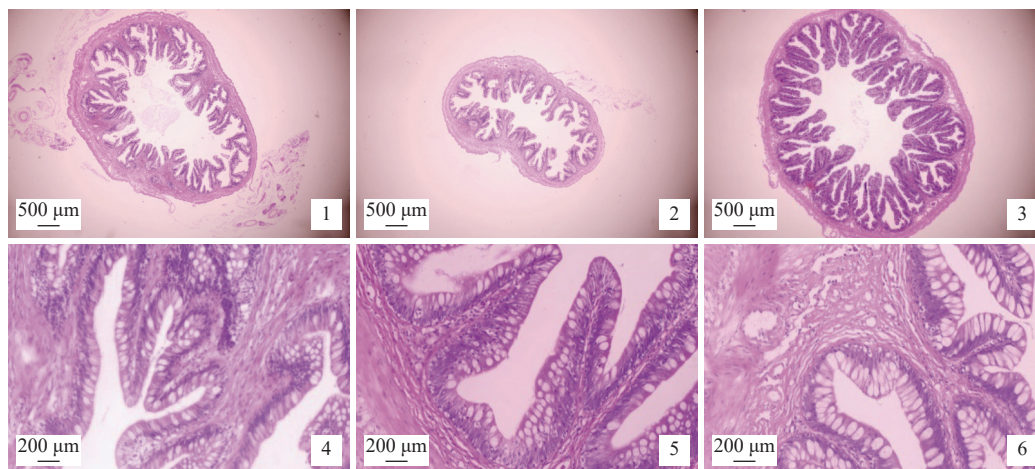
Plate I Liver morphology and structure of *S. chuatsi* during overwintering period

1. 0-week liver (200×), 2. 8-week liver (200×), 3. 16-week liver (200×).

响鱼类活动和生长的重要环境变量<sup>[8]</sup>。在本实验中, 水温从 14.5 °C 降至 7.5 °C, 鳊的特定生长率随温度的降低而降低, 环境温度超过了鱼类的适宜范围, 摄食能力降低, 用于调节机体适应环境的能量和维持生命活动的能量较多, 表现出增重率降低, 饲料系数上升<sup>[9]</sup>。水温回升后, 环境温度逐渐适宜, 鳊摄食量上升, 基础代谢增强, 补偿性生长效果明显。这与 Azaza 等<sup>[10]</sup>在尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 的研究结果相似。武文一等<sup>[11]</sup>发现越冬期间草鱼 (*Ctenopharyngodon idella*) 在未投喂条件

下体重呈下降趋势, 所以在越冬期进行适量投喂, 保持营养物质的摄入, 在温度回升后可以提高鱼体特定生长率, 从而减少越冬期鱼体重下降造成的经济损失。

生物学性状是反映鱼体在环境变化条件下鱼体营养储备消耗情况最直接的量化指标<sup>[12]</sup>。本研究中越冬降温期增重率降低, 肥满度、肝体比、脏体比显著下降, 体形相对更加瘦长, 温度上升后, 鳊摄食量、增重率显著上升, 三项形体指标也逐渐上升。鱼体的营养成分在越冬期发生了显著变化。由于越冬前期, 温度逐



图版 II 越冬期鳊肠道形态结构

1. 0周肠道(40×), 2. 8周肠道(40×), 3. 16周肠道(40×), 4. 0周肠道(100×), 5. 8周肠道(100×), 6. 16周肠道(100×).

### Plate II Intestinal morphology and structure of *S. chuatsi* during overwintering period

1. 0-week intestinal tract (40×), 2. 8-week intestinal tract (40×), 3. 16-week intestinal tract (40×), 4. 0-week intestinal tract (100×), 5. 8-week intestinal tract (100×), 6. 16-week intestinal tract (100×).

渐下降, 鱼体处于适应性降温, 作为蓄能物质的脂肪消耗量大, 脂肪含量减少, 水分含量增加。而蛋白质作为构成组织的重要原料, 不易被动员。温度回升后, 与降温期相比, 鱼体内的各种酶的活性恢复, 新陈代谢加快, 鳊摄食显著增多, 蛋白逐日积累, 体组成随之改变。

### 3.2 越冬期鳊消化、抗氧化和免疫功能的适应性变化

鳊胃黏膜层基部中的胃腺细胞能够同时分泌胃蛋白酶原和胃酸, 属于泌酸胃酶型细胞。胃蛋白酶原是胃蛋白酶的无活性前体物质, 需要在胃质子泵 ( $H^+K^+ATPase$ ) 分泌的胃酸作用下激活为具有活性的胃蛋白酶, 胃蛋白酶对于食物进行初步消化。在低温下酶催化反应速率低, 鳊胃蛋白酶和胃  $H^+K^+ATPase$  随着温度的下降而下降, 水温回升后, 鳊摄食量、胃的消化和泌酸能力逐步上升, 体重也显著增加<sup>[13]</sup>。

肠道作为营养物质消化吸收的主要器官, 其中黏膜绒毛数量、高度以及消化酶活性反映鱼体对营养物质的消化吸收能力的高低。肠道中的胰蛋白酶是重要的内肽酶之一, 由胰腺分泌以酶原的形式进入肠道, 由肠激酶激活, 并激活其他酶, 共同消化饲料中蛋白质。淀粉酶、脂肪酶活性则反映鳊对饲料中碳水化合物与脂肪的消化分解能力<sup>[14]</sup>。鱼体内消化酶的活性在低温下将会被抑制<sup>[15]</sup>。本实验中越冬前期(降温

期)对肠道组织结构造成损伤, 其中肠绒毛高度变矮, 排列稀疏且呈不规则, 纹状缘萎缩、退化严重; 肠胰蛋白酶和淀粉酶活性显著下降, 反映出水温下降后鳊对饲料蛋白和淀粉消化能力的减弱。升温后鳊摄食量和肠消化酶活性显著上升, 这有助于鱼体对营养物质的消化吸收, 其体重因此迅速上升。其中肠淀粉酶活性增加的幅度不如胰蛋白酶和脂肪酶活性, 反映出温度回升后鳊对蛋白质和脂肪的需求强于碳水化合物。

水温的变化会导致鱼体氧化应激产生氧自由基 ROS, 这打破了氧化与抗氧化系统之间的平衡, 造成氧化产物剧增并减弱抗氧化系统的功能, 使抗氧化酶活性降低, 清除 ROS 能力减弱<sup>[16]</sup>。抗氧化系统包括酶系统如超氧化物酶、过氧化物酶、过氧化氢酶和非酶系统。T-AOC、T-SOD 作为抗氧化酶, 具有清除氧自由基的能力。MDA 是氧自由基作用于脂质的过氧化产物, 其含量高低反映鱼体中脂质过氧化的程度, 也间接反映鱼体氧化损伤的程度<sup>[17]</sup>。本研究中越冬期鳊肝脏抗氧化酶活性降低, MDA 含量上升, 诱导膜系统产生脂质过氧化反应, 引发生物膜磷脂降解, 使其通透性增加, 导致肝脏出现损伤<sup>[18]</sup>。ALT 和 AST 是广泛存在于动物肝细胞线粒体中的重要氨基酸转移酶<sup>[19]</sup>。当机体受到外界环境的压力, 细胞膜结构被破坏, ALT 和 AST 便会释放到血液中, 导致血液中转氨酶活性



升高, 鱼体正常代谢受阻。吉富罗非鱼 (GIFT *O. niloticus*)<sup>[20]</sup>、虹鳟 (*Oncorhynchus mykiss*)<sup>[21]</sup> 的血液中 ALT 和 AST 的活性随着低温胁迫时间的延长不断升高。本研究越冬期鳊血浆中 AST 活性呈上升趋势, 可能是低温和变温胁迫对鳊肝脏造成一定的损伤。尤其是在越冬后 16 周鳊的肝脏损伤最为严重, 肝细胞呈不规则形态, 空泡化严重, 这可能是因为水温的回升致使鳊摄食量迅速上升, 导致肝脏能量代谢负担加重, 肝细胞代谢功能受损, ROS 的增多破坏溶酶体膜, 使溶酶体膜通透性增强, 蛋白酶被释放到细胞质中, 导致肝细胞凋亡或坏死, 细胞核固缩、溶解等<sup>[22-23]</sup>。

温度胁迫会对养殖鱼类的免疫系统产生影响, 其中低温胁迫会抑制鱼体免疫防御和抗病能力<sup>[24]</sup>。IgM 作为鱼类特异性免疫系统中重要的免疫球蛋白, 其含量的高低可作为免疫能力强弱的重要指标。LZM 是鱼体非特异性免疫体系中的第一道屏障, 也是一种具有广谱抗菌作用的免疫活性物质。AKP 和 ACP 则是鱼体重要的非特异性免疫因子, 具有免疫防御的功能<sup>[25]</sup>。本实验中, 越冬前期血浆中 IgM 含量、LZM、AKP 活性呈下降趋势, 可能是低温使鱼体代谢率降低, 抑制免疫酶活性和抗体的释放, 导致免疫防御机制紊乱, 氧自由基过度积累, 免疫器官受到损伤<sup>[26]</sup>, 这与鲤 (*Cyprinus carpio*)<sup>[27]</sup> 和虹鳟<sup>[28]</sup> 结果类似。温度逐渐回升后, 鱼体消化酶活性逐渐上升, 新陈代谢加快, 氧化还原反应产生的氧自由基增多, 为抵抗氧化应激所导致的炎症反应, 加速了 AKP 和 LZM 的释放, 免疫应答逐渐活跃<sup>[29]</sup>。

#### 4 结论

本实验中, 越冬期 2 天/次表观饱食投喂 112 d, 鳊生长性能、形态、生化组成及组织结构呈动态变化。降温期 (14.5 °C 降温至 7.5 °C), 鳊摄食量减少、饲料系数增大; 肥满度降低, 抗氧化能力和免疫能力减弱。肠道消化功能和肝功能降低。升温期 (7.5 °C 升温至 14.5 °C), 鳊体重、摄食量在 14.5 °C 后迅速上升。形态恢复至越冬前, 抗氧化能力减弱, 氧化应激程度进一步加重。肠道结构和消化功能得到改善, 但肝脏结构和功能受损。

#### 参考文献 (References):

- [1] Yanagitsuru Y R, Main M A, Lewis L S, *et al.* Effects of temperature on hatching and growth performance of embryos and yolk-sac larvae of a threatened estuarine fish: longfin smelt (*Spirinchus thaleichthys*)[J]. *Aquaculture*, 2021, 537: 736502.
- [2] Li S, Guo H, Chen Z Y, *et al.* Effects of acclimation temperature regime on the thermal tolerance, growth performance and gene expression of a cold-water fish, *Schizothorax prenanti*[J]. *Journal of Thermal Biology*, 2021, 98: 102918.
- [3] 张先炳, 胡亚萍, 杨威, 等. 水温对淡水温水性鱼类生命活动的影响 [J]. *水生态学杂志*, 2021, 42(4): 117-122.  
Zhang X B, Hu Y P, Yang W, *et al.* Effect of water temperature on the life activities of temperate freshwater fish[J]. *Journal of Hydroecology*, 2021, 42(4): 117-122 (in Chinese).
- [4] Drobny P. Influence of body size, intra-and inter-specific salmonid densities, and habitat on overwinter survival of juvenile Coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*) in Prairie Creek, California[D]. Arcata: The Faculty of Humboldt State University, 2016.
- [5] Xu W J, Li H Y, Wu L Y, *et al.* Dietary *Scenedesmus ovalternus* improves disease resistance of overwintering gibel carp (*Carassius gibelio*) by alleviating toll-like receptor signaling activation[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2020, 97: 351-358.
- [6] 陈剑斌, 于俊琦, 徐杭忠, 等. 配合饲料和饵料鱼对鳊生长、胃肠结构功能及肉质的影响 [J]. *水产学报*, 2023, 47(10): 109608.  
Chen J B, Yu J Q, Xu H Z, *et al.* Effects of compound feed and bait fish on growth, gastrointestinal structure and function and meat quality of *Siniperca chuatsi*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2023, 47(10): 109608 (in Chinese).
- [7] 徐杭忠, 张皓迪, 王贵龙, 等. 冬季低温鳊短期饥饿和摄食的生理状态比较 [J]. *水产学报*, 2022, 46(9): 1572-1581.  
Xu H Z, Zhang H D, Wang G L, *et al.* Comparison of physiological status of short-term starvation and feeding of mandarin fish (*Siniperca chuatsi*) at low temperature in winter[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(9): 1572-1581 (in Chinese).
- [8] Donaldson M R, Cooke S J, Patterson D A, *et al.* Cold shock and fish[J]. *Journal of Fish Biology*, 2008, 73(7): 1491-1530.
- [9] Crouse C, Davidson J, Good C. The effects of two water temperature regimes on Atlantic salmon (*Salmo salar*) growth performance and maturation in freshwater recirculating aquaculture systems[J]. *Aquaculture*, 2022, 553: 738063.
- [10] Azaza M S, Dhraïef M N, Kraïem M M. Effects of water temperature on growth and sex ratio of juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus* (Linnaeus) reared in geothermal waters in southern Tunisia[J]. *Journal of thermal Biology*, 2008, 33(2): 98-105.
- [11] 武文一, 吉红. 越冬胁迫对草鱼抗氧化能力及脂肪酸组成的

- 影响[J]. *水生生物学报*, 2022, 46(8): 1223-1236.
- Wu W Y, Ji H. Effects of overwintering on antioxidant capacity and fatty acid composition in grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*)[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2022, 46(8): 1223-1236 (in Chinese).
- [12] Sun S M, Su Y L, Yu H, *et al.* Starvation affects the intestinal microbiota structure and the expression of inflammatory-related genes of the juvenile blunt snout bream, *Megalobrama amblycephala*[J]. *Aquaculture*, 2020, 517: 734764.
- [13] Kageyama T. Pepsinogens, progastricins, and prochymosins: structure, function, evolution, and development[J]. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 2002, 59(2): 288-306.
- [14] Li R X, Amenyogbe E, Lu Y, *et al.* Effects of low-temperature stress on intestinal structure, enzyme activities and metabolomic analysis of juvenile golden pompano (*Trachinotus ovatus*)[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2023, 10: 1114120.
- [15] Sakyi M E, Cai J, Tang J F, *et al.* Short term starvation and re-feeding in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*, Linnaeus 1758): growth measurements, and immune responses[J]. *Aquaculture Reports*, 2020, 16: 100261.
- [16] Song H B, Xu D D, Tian L, *et al.* Overwinter mortality in yellow drum (*Nibea albiflora*): insights from growth and immune responses to cold and starvation stress[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2019, 92: 341-347.
- [17] Ren J Y, Liu C P, Zhao D, *et al.* The role of heat shock protein 70 in oxidant stress and inflammatory injury in quail spleen induced by cold stress[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(21): 21011-21023.
- [18] Lesser M P. Oxidative stress in marine environments: biochemistry and physiological ecology[J]. *Annual Review of Physiology*, 2006, 68: 253-278.
- [19] Zhu C Z, Li D, Chen W J, *et al.* Effects of dietary host-associated *Lactococcus lactis* on growth performance, disease resistance, intestinal morphology and intestinal microbiota of mandarin fish (*Siniperca chuatsi*)[J]. *Aquaculture*, 2021, 540: 736702.
- [20] 刘波, 王美垚, 谢骏, 等. 低温应激对吉富罗非鱼血清生化指标及肝脏 HSP70 基因表达的影响 [J]. *生态学报*, 2011, 31(17): 4866-4873.
- Liu B, Wang M Y, Xie J, *et al.* Effects of acute cold stress on serum biochemical and immune parameters and liver HSP70 gene expression in GIFT strain of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*)[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(17): 4866-4873 (in Chinese).
- [21] 管标. 急性温度胁迫对虹鳟血液成分和关键代谢的影响 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2014.
- Guan B. The effect of acute temperature stress on blood components and key metabolism mechanisms in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2014 (in Chinese).
- [22] Srikanth K, Pereira E, Duarte A C, *et al.* Glutathione and its dependent enzymes' modulatory responses to toxic metals and metalloids in fish—a review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(4): 2133-2149.
- [23] Guo J S, Wu P H, Cao J L, *et al.* The PFOS disturbed immunomodulatory functions via nuclear Factor- $\kappa$ B signaling in liver of zebrafish (*Danio rerio*)[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2019, 91: 87-98.
- [24] Makrinos D L, Bowden T J. Natural environmental impacts on teleost immune function[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2016, 53: 50-57.
- [25] Yan X B, Chen Y, Dong X H, *et al.* Ammonia toxicity induces oxidative stress, inflammatory response and apoptosis in hybrid grouper ( $\text{♀}$  *Epinephelus fuscoguttatus*  $\times$   $\text{♂}$  *E. lanceolatus*)[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2021, 8: 667432.
- [26] Gao X Q, Fei F, Huang B, *et al.* Alterations in hematological and biochemical parameters, oxidative stress, and immune response in *Takifugu rubripes* under acute ammonia exposure[J]. *Comparative Biochemistry and Physiology-Part C: Toxicology & Pharmacology*, 2021, 243: 108978.
- [27] Engelsma M Y, Hougee S, Nap D, *et al.* Multiple acute temperature stress affects leucocyte populations and antibody responses in common carp, *Cyprinus carpio* L.[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2003, 15(5): 397-410.
- [28] 侯亚义, 韩晓冬. 温度和类固醇激素对虹鳟免疫球蛋白 M(IgM) 的影响 [J]. *南京大学学报 (自然科学版)*, 2001, 37(5): 563-568.
- Hou Y Y, Han X D. Effects of temperature and steroid hormones on Immunoglobulin M(IgM) in immature rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*[J]. *Journal of Nanjing University (Natural Science Edition)*, 2001, 37(5): 563-568 (in Chinese).
- [29] Scharsack J P, Franke F. Temperature effects on teleost immunity in the light of climate change[J]. *Journal of Fish Biology*, 2022, 101(4): 780-796.

## Dynamic changes of growth, digestion, metabolism, antioxidant and immune ability of *Siniperca chuatsi* during overwintering period

YU Junqi<sup>1</sup>, LU Hua<sup>1</sup>, CHEN Qiqi<sup>1</sup>, WANG Wenjie<sup>1</sup>, CHEN Yushuang<sup>1</sup>, ZHOU Da<sup>1</sup>,  
LI Yong<sup>2</sup>, LUO Hao<sup>2</sup>, ZHAI Xuliang<sup>3</sup>, XUE Yang<sup>3</sup>, LUO Jinqiang<sup>4</sup>,  
CHEN Yongjun<sup>1</sup>, ZHAO Min<sup>2\*</sup>, LUO Li<sup>1\*</sup>

1. Key Laboratory of Freshwater Fish Resources and Reproductive Development, Ministry of Education,  
Integrative Science Center of Germplasm Creation in Western China (Chongqing) Science City,

College of Fisheries, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. New Hope Liuhe Co., Ltd., Chengdu 610023, China;

3. Chongqing Aquatic Technology Promotion Station, Chongqing 400700, China;

4. Tongnan District of Chongqing Agricultural Science and Technology Extension Center, Chongqing 402660, China

**Abstract:** In order to investigate the physiological dynamic changes in growth, digestion, metabolism, antioxidant, and immune ability of *Siniperca chuatsi* during the overwintering period, 240 *S. chuatsi* with a body weight of (107.63±0.48) g were selected and divided into growth and sampling groups with four replicates per group and 30 fish per replicate. Feed once every two days for 112 days. During this period, the water temperature experienced a cooling period of 14.5–7.5 °C (0–6 weeks) and a warming period of 7.5–14.5 °C (6–16 weeks). Seven sampling points were set at 0 (0-week), 2 weeks (2-week), 4 weeks (4-week), 6 weeks (6-week), 8 weeks (8-week), 12 weeks (12-week), and 16 weeks (16-week). The results showed that the weight gain rate (WGR), specific growth rate (SGR) and feeding rate (FR) decreased gradually and then increased gradually after reaching their lowest values at 6-week. The feed coefficient increased significantly at 6-week and then decreased. The activity of the gastric proton pump (H<sup>+</sup>-K<sup>+</sup>-ATPase), intestinal trypsin, and amylase increased after a decrease of 6-week. The liver total antioxidant capacity and superoxide dismutase activity decreased significantly at 6-week, while malondialdehyde content increased significantly. The plasma acid phosphatase activity, immunoglobulin content, and spleen immunoglobulin content decreased significantly and then increased. At 8-week, the liver structure begins to show partial nuclear migration to the periphery of hepatocytes and vacuolar degeneration. At 16-week, the *S. chuatsi* liver cells had an irregular morphology and disappeared or even dissolved nuclei. The intestinal villi at 8-week were lower, sparser, and irregular than those at 0-week, and the development of intestinal villi at 16-week was better than that at 0-week and 8-week. In conclusion, the digestive, antioxidant, and immune abilities of *S. siniperca* in the early overwintering period were weakened, the body weight of *S. siniperca* in the late overwintering period was significantly increased, and liver structure and function were seriously damaged. This study provides a theoretical basis for the management of *S. chuatsi* feeding and breeding during overwintering period, and promotes the high-quality development of the *S. chuatsi* farming industry.

**Key words:** *Siniperca chuatsi*; low water temperature; overwintering period; anti-oxidation; immune capacity; digestion and metabolism; physiological change

**Corresponding authors:** LUO Li. E-mail: [luoli1972@163.com](mailto:luoli1972@163.com);

ZHAO Min. E-mail: [zhaomin4@newhope.cn](mailto:zhaomin4@newhope.cn)

**Funding projects:** Project of New Hope Liuhe Co., Ltd.; Chongqing Ecological Fishery Industry Technology System Project; Chongqing Aquatic Science and Technology Innovation Alliance Project (CQFTIU2022-04); Tongnan District Research Project of Chongqing (TK-2024-47)