

DOI: 10.12264/JFSC2025-0036

不同饵料对长江鲟亚成体生长、激素合成及健康状况的影响

王煜琦^{1,2}, 符鹏³, 吴金平², 张闯³, 沈丽², 冷小茜², 李罗新², 刘志刚², 罗江², 杜浩^{1,2*}

1. 华中农业大学水产学院, 湖北 武汉 430070;

2. 中国水产科学研究院长江水产研究所, 农业农村部淡水生物多样性保护重点实验室, 湖北 武汉 430223;

3. 重庆市水产科学研究所, 重庆 400020

摘要: 为研究不同饵料对长江鲟(*Acipenser dabryanus*)亚成体生长性能、激素合成及健康状况影响, 挑选体重为(8.46±1.64) kg 的 4~6 龄长江鲟亚成体 90 尾, 随机分为 5 组, 分别使用配合饲料、冰鲜鱼、蚯蚓干、混合饵料 1 (配合饲料和冰鲜鱼)和混合饵料 2 (配合饲料和蚯蚓干)投喂 1 年。结果显示: (1) 配合饲料投喂的长江鲟亚成体增重率(WGR)、特定生长率(SGR)和体长增长率(LGR)显著高于其他组($P<0.05$), 混合饵料投喂的长江鲟亚成体各项生长指标介于配合饲料组与冰鲜鱼、蚯蚓干组之间; (2) 冰鲜鱼、混合饵料 1 及蚯蚓干投喂的长江鲟亚成体雌鱼血清雌二醇(E₂)水平显著升高, 蚯蚓干组及 2 个混合饵料组雄鱼血清睾酮(T)水平显著升高, 同时冰鲜鱼、蚯蚓干及混合饵料投喂显著提升了长江鲟亚成体血清脂质水平($P<0.05$)。 (3) 配合饲料投喂的长江鲟亚成体血清谷丙转氨酶(ALT)、谷草转氨酶(AST)活力与 TP、ALB 含量显著高于其余组($P<0.05$)。 (4) 配合饲料及混合饵料 2 投喂的长江鲟亚成体血清总抗氧化能力(T-AOC)及谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-PX)活力显著高于其他组($P<0.05$), 混合饵料 1 投喂长江鲟亚成体的血清 SOD 活力显著高于蚯蚓干及混合饵料 2 投喂。 (5) 冰鲜鱼和 2 个混合饵料投喂的长江鲟亚成体血清 C3 含量显著高于配合饲料及蚯蚓干投喂($P<0.05$), 而配合饲料、蚯蚓干和混合饵料 2 投喂的长江鲟亚成体血清 C4 水平较高。结果表明, 配合饲料投喂的长江鲟亚成体在生长性能、蛋白质吸收和抗氧化能力上具有优势。冰鲜鱼、蚯蚓干及混合饵料投喂在促进性激素合成、脂质吸收及肝脏健康方面优于配合饲料, 其中配合饲料与蚯蚓干混合投喂的长江鲟亚成体在激素合成、肝脏健康、抗氧化及免疫方面的综合表现最佳。本研究可为人工养殖长江鲟亚成体的投喂策略提供参考, 也可借鉴冰鲜鱼及蚯蚓干的营养组成和长江鲟亚成体的代谢特性, 研发长江鲟专用饲料。

关键词: 长江鲟; 亚成体; 配合饲料; 冰鲜鱼; 蚯蚓干; 生长性能; 激素合成; 健康状况

中图分类号: S963

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2025)08-1138-11

长江鲟(*Acipenser dabryanus*)是我国特有的珍稀濒危鱼类, 其历史分布范围涵盖金沙江下游、长江中上游干流及主要支流水域^[1]。受过度捕捞、栖息地破坏及水利工程等人类活动影响, 其自然种群资源急剧下降^[2]。2022 年 7 月, 国际自然保护联盟(International Union for Conservation of Nature, IUCN)正式将其濒危等级从极危提升至野外灭绝, 标志着长江鲟自然种群的生态功能已完

全丧失^[3]。长江鲟的物种保护自 20 世纪 90 年代开始, 20 多年来围绕长江鲟的资源修复、人工繁育和保护养殖进行了系统研究^[4-6]。人工养殖长江鲟子二代于 2018 年实现了规模化繁育, 物种生存得到保障^[7]。但营养问题导致人工养殖长江鲟的高死亡率, 仍然是目前长江鲟资源保护的主要障碍之一^[8]。当前人工保种的长江鲟主要以市售的鲟配合饲料作为主要营养来源。虽然能满足基本

收稿日期: 2025-03-12; 修订日期: 2025-04-18.

基金项目: 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(2023TD08); 重庆市水产科学研究所财政专项(C20240109, C20240107)

作者简介: 王煜琦(2000-), 男, 硕士研究生, 研究方向为鱼类营养与饲料学. E-mail: w577295817@163.com

通信作者: 杜浩, 研究员, 主要研究方向为濒危水生动物保护生物学. E-mail: duhao@yfi.ac.cn

营养需求,但长期投喂会导致性腺发育迟缓,体质变弱^[9]。

冰鲜鱼是水产养殖常用的天然饵料,富含动物蛋白和油脂,营养全面^[10]。研究发现,使用冰鲜鱼投喂大口黑鲈(*Micropterus salmoides*)能够优化肌肉氨基酸、脂肪酸的组成,降低肝脏代谢负荷,改善健康状况^[11]。中华鲟(*Acipenser sinensis*)产后亲鱼采用配合饲料与冰鲜鱼混合的投喂策略能够促进营养物质吸收,提高生长、繁殖性能,加快产后恢复^[12]。蚯蚓具有较高的蛋白质含量及优质的脂肪酸组成,是水产动物优质的潜在饲料原料。在饲料中添加新鲜蚯蚓能够增加线鳢(*Channa striata*)生长性能和采食量^[13]。黄鳝(*Monopterus albus*)饲料中添加适量蚯蚓可促进其蛋白质、脂肪和淀粉的消化,提高生长性能^[14]。蚯蚓经脱水处理制得的蚯蚓干保留了蚯蚓大部分天然营养成分,相较于活蚯蚓,其不易腐败,储存和运输更加方便,便于大规模供应^[15]。迄今为止,有关生物饵料与配合饲料在鲟养殖中的对比研究只出现在早

期发育阶段^[16],对长江鲟亚成体开展相关研究尚未见报道。因此,本研究以亚成体长江鲟为研究对象,选择冰鲜鱼和蚯蚓干两种生物饵料,系统评价不同饵料对亚成体长江鲟生长、性激素合成及健康状况的影响。旨在探讨长江鲟的营养需求特点,为科学合理地改进其人工饲料配方提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验设计

本实验分为 5 个处理组,每组分别投喂商品鲟配合饲料、冰鲜鱼、蚯蚓干、混合饵料 1 (冰鲜鱼和配合饲料各占 50%)和混合饵料 2 (蚯蚓干和配合饲料各占 50%),分别记为处理组 E、F、W、EF 和 EW,养殖周期为 1 年。其中商品鲟配合饲料为山东升索饲料公司鲟专用饲料,冰鲜鱼及蚯蚓干由随县振丰黄鳝养殖专业合作社提供。配合饲料、冰鲜鱼及蚯蚓干主要营养成分见表 1,脂肪酸组成见表 2。

表 1 配合饲料、冰鲜鱼和蚯蚓干的主要营养成分
Tab. 1 The main nutritional components of compound feed, frozen fish and dried earthworms

营养成分 nutritional ingredient				$\bar{x}\pm\text{SE}$
营养成分 nutritional ingredient	配合饲料 compound feed	冰鲜鱼 frozen fish	蚯蚓干 dried earthworm	
粗蛋白 crude protein	54.95±0.53	22.41±1.87	46.81±0.57	
粗脂肪 crude lipid	7.89±0.36	15.06±0.27	1.22±0.05	
灰分 ash	10.99±0.04	1.85±0.03	45.72±0.49	
水分 moisture	8.23±0.07	60.74±1.22		

1.2 实验鱼与养殖管理

养殖实验在重庆市水产科学研究所南川基地完成。实验所用长江鲟亚成体来源于中国水产科学研究院长江水产研究所荆州太湖中华鲟养殖基地。实验开始前,随机挑选雌雄各 45 尾平均体长(97.48±8.71) cm,平均体重(8.46±1.64) kg 的健康长江鲟亚成体在养殖池中暂养两周,适应养殖环境。正式实验开始时,将实验鱼分为 5 个处理组,每组 3 个平行,每个平行 3 尾雌鱼 3 尾雄鱼,在长 10 m、宽 5 m、水深 1.2 m 的流水养殖池中进行养殖,实验周期 1 年。养殖期间采用表观饱食投喂法,每日上午 7:00 和下午 6:00 各投喂 1 次,每次喂食后 1 h 捞出残饵。养殖用水为山泉水,流水养

殖。养殖期间水温 13.0~20.0 ℃,pH 7.3~8.2,水中溶解氧浓度≥6 mg/L,氨氮浓度<0.5 mg/L。

1.3 样品采集与指标测定

养殖实验结束后,饥饿处理 24 h,使用 100 mg/LMS-222 溶液进行麻醉,麻醉后对每组 6 尾鱼全部进行测量采样。测量体长、体重,用于计算增重率(WGR)和体长增长率(LGR)。使用 5 mL 注射器在尾静脉处采集血液,血液在 4 ℃冰箱静置 4 h,4 ℃下 4000 r/min 离心 15 min,收集血清放置于-80 ℃冰箱用于性激素、血清生化、抗氧化及免疫指标测定。实验鱼采样得到中国水产科学研究院长江水产研究所实验动物福利伦理委员会的批准,取样过程遵守实验动物福利和相关制度。

表 2 配合饲料、蚯蚓干和冰鲜鱼的脂肪酸组成(干重)

Tab. 2 Fatty acids composition of compound feed, dried earthworms, and frozen fish (DW)

 $\bar{x} \pm \text{SE}$

指标 index	配合饲料 compound feed	冰鲜鱼 frozen fish	蚯蚓干 dried earthworm
C4:0	0.09±0.01	0.03±0.01	1.57±0.26
C6:0	0.02±0.01	0.01±0.00	0.14±0.00
C8:0	0.05±0.02	0.01±0.00	0.69±0.38
C10:0	0.06±0.03	0.02±0.00	0.47±0.04
C11:0	0.04±0.01	0.01±0.00	0.48±0.07
C12:0	0.24±0.09	0.09±0.02	2.48±0.34
C13:0	0.04±0.01	0.04±0.00	1.16±0.93
C14:0	2.32±0.60	7.29±0.28	1.87±0.11
C15:0	0.44±0.19	0.52±0.01	1.12±0.05
C16:0	23.85±5.69	19.58±0.07	17.47±0.43
C17:0	0.65±0.20	0.98±0.04	2.52±0.46
C18:0	7.49±1.62	2.52±0.59	16.38±1.61
C20:0	0.32±0.28	0.27±0.05	0.55±0.19
C21:0	0.12±0.02	0.07±0.02	0.22±0.04
C22:0	0.14±0.18	0.04±0.02	0.15±0.10
C23:0	0.06±0.02	0.04±0.03	0.20±0.01
C24:0	2.56±0.63	10.51±0.09	5.24±0.91
SFA	38.47±8.65	42.00±0.75	52.71±2.49
C14:1n-5	0.07±0.04	0.07±0.00	1.19±0.24
C15:1n-5	0.007±0.00	0.07±0.00	0.52±0.02
C16:1n-7	3.12±0.83	4.34±0.25	1.46±0.11
C17:1n-7	0.20±0.06	0.15±0.01	0.26±0.12
C18:1n-9t	0.08±0.07	0.13±0.00	0.67±0.38
C18:1n-9c	22.44±7.37	8.52±0.19	5.29±0.72
C20:1n-9	0.21±0.04		0.60±0.01
C24:1n-9	0.33±0.11	0.51±0.05	2.58±0.77
MUFA	31.66±8.15	13.76±0.02	12.57±0.11
C18:2n-6t	0.40±0.18	0.05±0.00	4.95±1.12
C18:2n-6c	15.08±0.28	1.44±0.11	6.65±0.33
C18:3n-6	0.41±0.08	0.13±0.01	0.12±0.03
C18:3n-3	5.83±1.48	15.55±0.74	0.75±0.06
C20:2n-9	0.39±0.25	0.33±0.26	1.28±0.13
C20:3n-3	0.51±0.14		1.21±0.25
C20:3n-6	0.34±0.07	0.16±0.04	1.89±0.51
C20:4n-6(ARA)	1.01±0.13	13.70±0.43	8.13±0.05
C20:5n-3 (EPA)	0.53±0.02	0.15±0.01	2.37±0.12
C22:2n-9	0.20±0.04	0.11±0.01	0.29±0.13
C22:6n-3 (DHA)	5.40±1.92	12.62±0.01	7.08±0.01
PUFA	29.87±16.80	44.24±0.78	34.72±2.38

注: SFA 表示饱和脂肪酸, MUFA 表示单不饱和脂肪酸, PUFA 表示多不饱和脂肪酸。

Note: SFA indicates saturated fatty acids, MUFA indicates monounsaturated fatty acids, PUFA indicates polyunsaturated fatty acids.

1.3.1 生长性能指标测定 研究中生长指标所用公式如下:

增重率(weight gain rate, WGR, %) $=[(W_t-W_0)/W_0] \times 100\%$;

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

体长增长率(LGR, %) $=(L_t-L_0)/L_0 \times 100\%$ 。

式中, W_t 代表终末体重(kg), W_0 代表初始体重(kg), t 为实验天数(d), L_t 代表终末体长(m), L_0 代表初始体长(m)。

1.3.2 血清激素及生化指标测定 血清雌二醇(E_2)、睾酮(T)在武汉市第三医院采用化学发光法进行测定。血清样品采用全自动生化分析仪(BS-460, 深圳迈瑞生物医疗电子股份有限公司)检测以下指标: 谷丙转氨酶(ALT)、谷草转氨酶(AST)、碱性磷酸酶(ALP)的活性, 以及葡萄糖(GLU)、甘油三酯(TG)、高密度脂蛋白胆固醇(HDL-C)、低密度脂蛋白胆固醇(LDL-C)、总胆固醇(TCHO)、总蛋白(TP)和白蛋白(ALB)含量。

1.3.3 血清抗氧化、免疫指标测定 血清丙二醛(MDA)根据 TBA 法测定, 总抗氧化能力(T-AOC)根据 ABTS 法测定, 谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)活力根据比色法测定, 超氧化物歧化酶(SOD)活力根据 WST-1 法测定, 过氧化氢酶(CAT)活力根据钼酸铵法测定。血清免疫指标中补体 C3 (complement C3)、补体 C4 (complement C4)、免疫球蛋白 M (IgM)含量使用免疫比浊法测定。测定使用试剂盒均采购自南京建成生物工程研究所。

1.4 数据分析

所有实验数据使用 SPSS 25.0 软件进行统计分析。采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验各处理组间指标差异, 分析前均对样本数据进行正态性检验以及方差齐性检验。当不同处理组之间存在显著差异($P < 0.05$)时, 采用 Duncan's 法进行多重比较, 数值以平均值±标准误($\bar{x} \pm \text{SE}$)表示。数据处理后使用 GraphPad Prism 8.0 软件进行柱状图绘制。

2 结果与分析

2.1 不同饵料对长江鲟亚成体生长指标的影响

5 种饵料投喂长江鲟亚成体后的生长指标见表 3。配合饲料组长江鲟增重率和特定增长率显

著高于其他组($P<0.05$), 其次是冰鲜鱼组、混合饵料 1 组及混合饵料 2 组, 蚯蚓干组显著低于其他组($P<0.05$)。体长增长率分为 3 个梯度, 配合饲料

组最高, 两个混合饵料组次之, 冰鲜鱼组和蚯蚓干组最低, 且 3 个梯度间存在显著差异($P<0.05$)。5 组长江鲟养殖期间成活率均为 100%。

表 3 不同饵料对长江鲟生长指标的影响

Tab. 3 The effect of different feeds on the growth indicators of Yangtze sturgeon

n=6; $\bar{x}\pm\text{SE}$

指标 index	E	F	W	EF	EW
初始体重/kg W_0	8.08±1.86	8.78±1.41	8.15±1.68	8.94±2.44	8.35±0.79
终末体重/kg W_t	12.44±2.89	12.65±2.07	11.06±2.25	13.53±2.83	11.92±0.90
增重率/% WGR	54.02±3.19 ^a	44.11±2.35 ^b	35.89±6.33 ^c	44.41±4.15 ^b	42.97±5.14 ^b
特定生长率/(%/d) SGR	0.12±0.01 ^a	0.10±0.01 ^b	0.07±0.01 ^c	0.10±0.02 ^b	0.09±0.04 ^b
体长增长率/% LGR	10.83±2.28 ^a	7.33±1.49 ^c	7.49±2.12 ^c	8.31±1.94 ^{bc}	9.71±1.37 ^b

注: 同行数据上标不同字母代表组间存在显著差异($P<0.05$)。处理组 E、F、W、EF 和 EW 分别投喂商品鲟配合饲料、冰鲜鱼、蚯蚓干、混合饵料 1 (冰鲜鱼和配合饲料各占 50%)和混合饵料 2 (蚯蚓干和配合饲料各占 50%)。

Note: Values in each row with different superscripts are significantly different ($P<0.05$). W_0 is the intial weight, W_t is the teminal weight. Treatment groups E, F, W, EF and EW were fed with compound feed, frozen fish, dried earthworm, mixed feed 1 (compound feed and frozen fish), or mixed feed 2 (compound feed and dried earthworm), respectively.

2.2 不同饵料对长江鲟亚成体血清激素含量的影响

长江鲟亚成体血清激素含量如图 1 所示, 5 个实验组中, 雌性长江鲟血清雌二醇的结果比较显示, 冰鲜组和蚯蚓干组显著高于配合饲料组和混

合饵料 2 组($P<0.05$)。雄性长江鲟血清睾酮的结果比较显示, 蚯蚓干组和混合饵料 2 组显著高于其余各组($P<0.05$), 混合饵料 1 组显著高于配合饲料组和冰鲜鱼组($P<0.05$)。

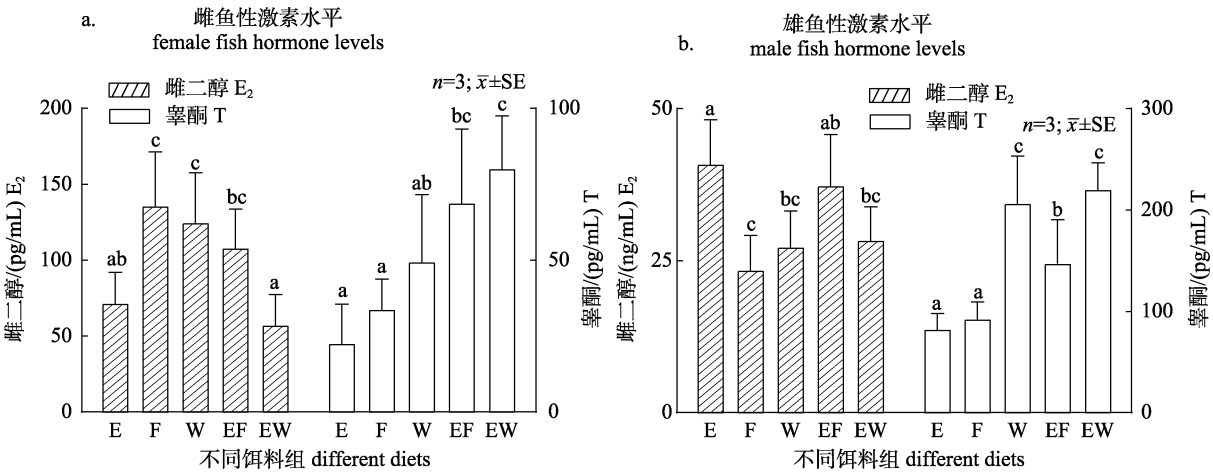


图 1 不同饵料对雌雄长江鲟性激素的影响

a. 雌鱼; b. 雄鱼。饵料组 E、F、W、EF 和 EW 分别投喂商品鲟配合饲料、冰鲜鱼、蚯蚓干、混合饵料 1 (冰鲜鱼和配合饲料各占 50%)和混合饵料 2 (蚯蚓干和配合饲料各占 50%)。字母不同表示各实验组间存在显著性差异($P<0.05$)。

Fig. 1 The effect of different feeds on the sex hormones of male and female Yangtze sturgeon

a. Female; b. Male. Treatment groups E, F, W, EF and EW were fed with compound feed, frozen fish, dried earthworm, mixed feed 1 (compound feed and frozen fish), or mixed feed 2 (compound feed and dried earthworm), respectively. Different letters indicate a significant difference between experimental groups for the same parameter ($P<0.05$).

2.3 不同饵料添加对长江鲟亚成体血清生化指标的影响

各组长江鲟血清生化指标结果如表 4 所示, 配合饲料组血清血糖含量显著高于蚯蚓干组和混

合饵料 2 组 ($P<0.05$)。同时发现配合饲料组谷丙转氨酶、谷草转氨酶两种酶活力显著高于蚯蚓干组($P<0.05$), 碱性磷酸酶活力显著高于蚯蚓干及混合饵料 2 组($P<0.05$)。冰鲜鱼组和蚯蚓干组甘油

三酯含量显著高于配合饲料组($P<0.05$), 两个混合饵料组也略高于配合饲料组。蚯蚓干组高密度脂蛋白和低密度脂蛋白含量最高, 显著高于配合饲料组和混合饵料 1 组($P<0.05$), 蚯蚓干组和混合饵料 2 组胆固醇含量显著高于其他组($P<0.05$)。配合饲料组白蛋白、总蛋白含量最高, 显著高于

冰鲜鱼组及蚯蚓干组($P<0.05$)。
2.4 不同饵料对长江鲟亚成体血清抗氧化及免疫指标的影响
各组长江鲟亚成体血清抗氧化指标结果如图 2 所示, 配合饲料组和混合饵料 2 组总抗氧化能力高于冰鲜鱼组, 且显著高于蚯蚓干组和混合饵

表 4 不同饵料对长江鲟血清生化指标的影响
Tab. 4 Effects of different diets on the serum biochemical parameters of Yangtze sturgeon

指标 index	E	F	W	EF	EW
血糖/(mmol/L) GLU	1.71±0.27 ^a	1.43±0.22 ^{ab}	1.27±0.28 ^b	1.61±0.23 ^{ab}	1.28±0.44 ^b
谷丙转氨酶/(U/L) ALT	4.43±1.49 ^a	3.57±1.38 ^{ab}	2.35±1.30 ^b	3.00±0.59 ^{ab}	3.35±1.19 ^{ab}
谷草转氨酶/(U/L) AST	123.85±16.33 ^a	118.97±34.82 ^a	95.95±15.56 ^b	108.08±10.01 ^{ab}	103.33±14.36 ^{ab}
碱性磷酸酶/(U/L) ALP	91.13±12.96 ^a	90.57±10.10 ^a	68.78±6.44 ^b	88.37±15.13 ^a	73.83±11.13 ^b
甘油三酯/(mmol/L) TG	3.04±0.70 ^a	4.40±1.26 ^b	4.11±0.53 ^b	3.70±0.60 ^{ab}	3.85±0.90 ^b
低密度脂蛋白/(mmol/L) LDL-C	0.83±0.19 ^a	1.02±0.37 ^{ab}	1.14±0.13 ^b	0.85±0.28 ^a	0.93±0.54 ^{ab}
高密度脂蛋白/(mmol/L) HDL-C	0.38±0.09 ^a	0.49±0.18 ^a	0.90±0.09 ^b	0.35±0.13 ^a	0.64±0.15 ^{ab}
总胆固醇/(mmol/L) TC	1.81±0.28 ^a	2.22±0.26 ^a	2.89±0.39 ^b	1.96±0.52 ^a	2.95±0.54 ^b
白蛋白/(g/L) ALB	12.71±3.32 ^a	8.72±1.10 ^b	9.15±1.89 ^b	10.38±1.76 ^{ab}	9.60±2.29 ^b
总蛋白/(g/L) TP	41.32±5.74 ^a	27.14±2.10 ^b	27.23±5.63 ^b	31.53±3.78 ^b	27.87±1.43 ^b

注: 同行数据上标不同字母代表组间存在显著差异($P<0.05$)。饵料组 E、F、W、EF 和 EW 分别投喂商品鲟配合饲料、冰鲜鱼、蚯蚓干、混合饵料 1 (冰鲜鱼和配合饲料各占 50%)和混合饵料 2 (蚯蚓干和配合饲料各占 50%)。
Note: Values in each row with different superscripts are significantly different($P<0.05$). Treatment groups E, F, W, EF and EW were fed with compound feed, frozen fish, dried earthworm, mixed feed 1 (compound feed and frozen fish), or mixed feed 2 (compound feed and dried earthworm), respectively.

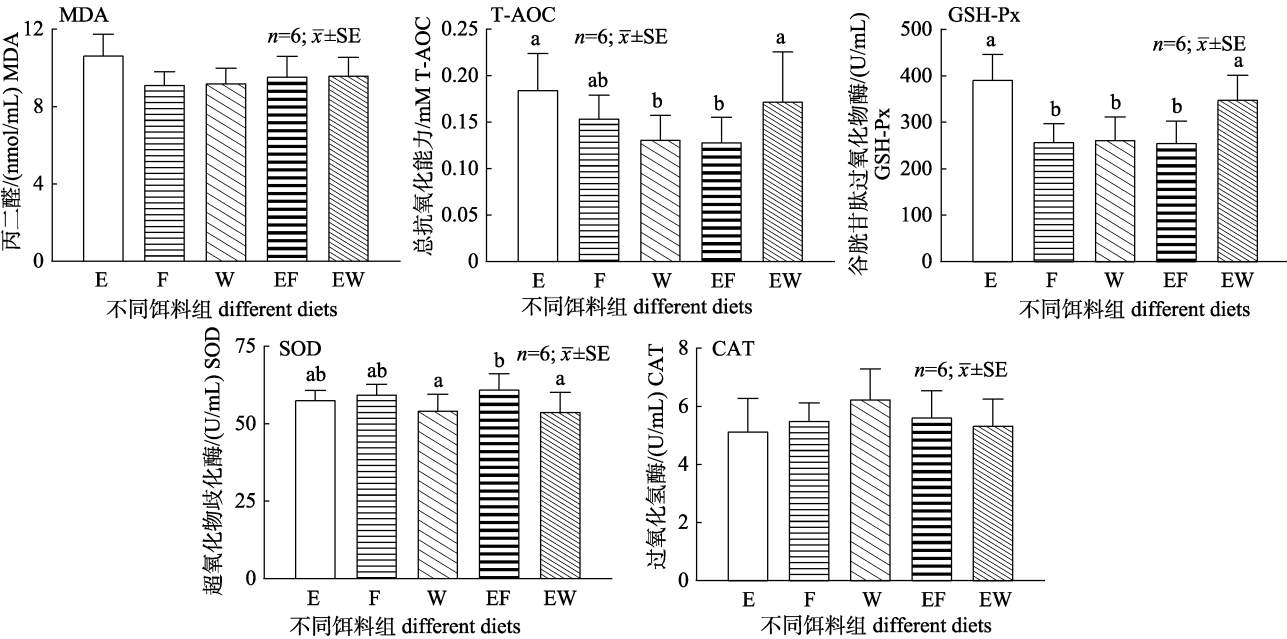


图 2 不同饵料对长江鲟抗氧化酶活力的影响

字母不同表示各实验组间存在显著性差异($P<0.05$)。饵料组 E、F、W、EF 和 EW 分别投喂商品鲟配合饲料、冰鲜鱼、蚯蚓干、混合饵料 1 (冰鲜鱼和配合饲料各占 50%)和混合饵料 2 (蚯蚓干和配合饲料各占 50%)。

Fig. 2 The effect of different feeds on the activity of antioxidant enzymes in Yangtze sturgeon
Different letters indicate a significant difference between experimental groups for the same parameter($P<0.05$). Treatment groups E, F, W, EF and EW were fed with compound feed, frozen fish, dried earthworm, mixed feed 1 (compound feed and frozen fish), or mixed feed 2 (compound feed and dried earthworm), respectively.

料 1 组($P<0.05$)。同时配合饲料组和混合饵料 2 组谷胱甘肽过氧化物酶活力显著高于其他组($P<0.05$)。混合饵料 1 组超氧化物歧化酶活力显著高于蚯蚓干组和混合饵料 2 组($P<0.05$)。各组丙二醛含量和过氧化氢酶活力无显著差异($P>0.05$)。

血清免疫指标结果如图 3 所示, 冰鲜鱼组和两个混合饵料组血清补体 C3 含量显著高于蚯蚓干组($P<0.05$)。配合饲料组和蚯蚓干组血清补体 C4 含量显著高于冰鲜鱼组和混合饵料 1 组($P<0.05$)。各组血清 IgM 含量无显著性差异。

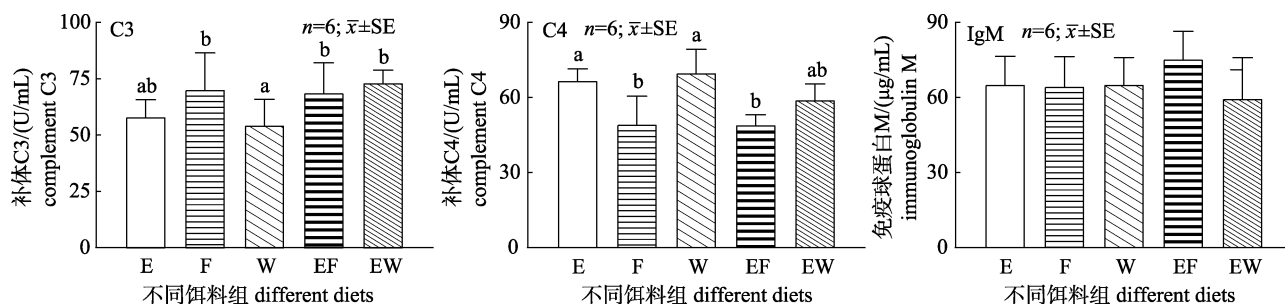


图 3 不同饵料对长江鲟免疫指标的影响

字母不同表示各实验组间存在显著性差异($P<0.05$)。饵料组 E、F、W、EF 和 EW 分别投喂商品鲟配合饲料、冰鲜鱼、蚯蚓干、混合饵料 1 (冰鲜鱼和配合饲料各占 50%) 和混合饵料 2 (蚯蚓干和配合饲料各占 50%)。

Fig. 3 The effect of different feeds on the immune parameter of Yangtze sturgeon

Different letters indicate a significant difference between experimental groups for the same parameter($P<0.05$). Treatment groups E, F, W, EF and EW were fed with compound feed, frozen fish, dried earthworm, mixed feed 1 (compound feed and frozen fish), or mixed feed 2 (compound feed and dried earthworm), respectively.

3 讨论

3.1 不同饵料对长江鲟亚成体生长性能的影响

本研究结果显示, 投喂配合饲料的长江鲟亚成体增重率、特定生长率和体长增长率显著高于冰鲜鱼、蚯蚓干及混合饵料投喂。与本研究相似, Schulz 等^[17]在白梭吻鲈(*Sander lucioperca*)幼鱼的研究中发现配合饲料投喂取得比生物饵料更高的特定生长率。Zheng 等^[18]使用配合饲料投喂中华鲟, 相较于用鲫(*Carassius auratus*)和大口黑鲈鱼块投喂获得更佳的生长性能。推测本研究使用的配合饲料营养成分及配比更符合长江鲟亚成体的生长需求, 长江鲟作为杂食性鱼类, 对冰鲜鱼及蚯蚓干等生物饵料的利用能力较弱^[19]。此外, 经过加工处理的配合饲料可能更易于长江鲟消化吸收^[20]。在长江鲟开口饵料的研究中, 发现使用水蚯蚓喂养的长江鲟增重率和特定生长率显著高于配合饲料^[16], 与本研究结果不同, 原因可能在于不同发育阶段的长江鲟营养需求存在显著差异。

在本研究中, 2 个混合饵料与冰鲜鱼投喂的长江鲟亚成体生长性能无显著差异, 但 3 组均显著高于蚯蚓干投喂。冰鲜鱼与蚯蚓干投喂的差异可

能与两者营养组成上的差异相关, 蚯蚓干虽然与冰鲜鱼相比具有较高的蛋白质水平, 但其脂质含量较低。混合饵料 2 (蚯蚓干和配合饲料各占 50%) 生长性能优于蚯蚓干投喂组, 其原因可能是因为配合饲料的添加。Mohanta 等^[21]研究表明, 使用添加蚯蚓粉的颗粒饲料投喂的南亚野鲮(*Labeo rohita*), 相比整条冻蚯蚓投喂表现出更好的生长效果, 说明蚯蚓的添加形式对养殖效果有显著影响。蚯蚓的角质层富含几丁质, 活蚯蚓与蚯蚓干过高的几丁质含量会降低饲料效率和蛋白质利用率^[22]。

3.2 不同饵料对长江鲟亚成体血清性激素含量及脂质代谢的影响

性类固醇激素是调节生殖、生长和性别发育等生理过程的重要激素^[23]。张涛等^[24]研究发现, 西伯利亚鲟(*Acipenser baerii*)雌雄血清 E_2 和 T 水平差异显著, 其含量随性腺发育阶段发生明显变化。本研究同样发现长江鲟亚成体雌雄血清 E_2 与 T 差异显著。研究结果显示, 使用配合饲料投喂的长江鲟亚成体雌鱼血清 E_2 含量显著低于投喂冰鲜鱼、蚯蚓干及混合饵料 1 的雌鱼。而投喂配合饲料的雄鱼 T 含量与投喂冰鲜鱼的雄鱼近似,

显著低于投喂蚯蚓干及 2 个混合饵料的雄鱼。这表明冰鲜鱼和蚯蚓干对雌性长江鲟亚成体血清 E_2 调节有积极影响, 而蚯蚓干对雄性长江鲟亚成体血清 T 调节作用较为显著。周越等^[12]在中华鲟的研究中发现冰鲜鱼和混合投喂饵料有助于提升产后亲鱼血清 E_2 含量。徐翱^[25]也发现饲料中冰鲜鱼比例的增加, 会提高施氏鲟、杂交鲟和西伯利亚鲟血清 E_2 含量。Wu 等^[26]研究发现饲料 ARA 含量会影响中华鲟性类固醇激素的合成。Xu 等^[27]发现多不饱和脂肪酸能够促进鲤(*Cyprinus carpio*)亲鱼性腺发育, 进而提高繁殖性能。通过对比本研究中配合饲料与冰鲜鱼、蚯蚓干的主要营养成分和脂肪酸含量, 发现冰鲜鱼含有较高含量的脂肪和多不饱和脂肪酸。而蚯蚓干虽然脂肪含量偏低, 但其多不饱和脂肪酸含量同样高于配合饲料。因此, 推测本研究冰鲜鱼和蚯蚓干促进长江鲟亚成体性激素合成的原因可能在于较高的多不饱和脂肪酸水平。

血清脂质是能量代谢和合成类固醇激素的重要底物, 其含量能够间接反映鱼类对饵料脂质吸收代谢情况^[28]。本研究结果显示, 冰鲜鱼、蚯蚓干及混合饵料 2 投喂的长江鲟亚成体血清 TG、TC、LDL-C 和 HDL-C 含量高于配合饲料投喂。说明长江鲟亚成体对冰鲜鱼及蚯蚓干中脂质的吸收效果优于配合饲料。Castro 等^[29]的研究也表明, 生物脂质更有利于鱼类吸收, 纯鱼油饲料喂养金头鲷(*Sparus aurata*)后的血液脂质含量高于混合植物油饲料。蚯蚓干投喂的长江鲟亚成体血清脂质含量略高于冰鲜鱼投喂, 可能与蛋白质含量有关。张姚铮泰等^[30]在丝尾鳊幼鱼(*Hemibagrus wyckioides*)的研究中发现血清脂质含量会随饲料蛋白质含量的升高而升高。此外, 子二代长江鲟相关研究表明, 饲料 n-3 多不饱和脂肪酸含量也影响长江鲟血清胆固醇浓度^[31]。冰鲜鱼和蚯蚓干投喂的长江鲟血清脂质升高的原因, 可能在于其较高的蛋白质含量及多不饱和脂肪酸水平。

3.3 不同饵料对长江鲟亚成体血清生化指标的影响

血清生化指标能够反映鱼体代谢水平、健康

水平、营养状况及适应环境变化^[4,32]。GLU 含量可用于评估鱼类对饲料碳水化合物的代谢状况^[33], 同时也是反映鱼体应激性的重要指标。本研究发现, 配合饲料组长江鲟亚成体血清 GLU 浓度高于其余 4 组, 说明长江鲟能够更好地吸收代谢配合饲料中的碳水化合物。Qu 等^[34]研究也发现提高饲料碳水化合物含量能够增加长江鲟血糖含量。血清 AST、ALT 和 ALP 常用于评估鱼类的肝脏损伤状况^[35], 正常情况下, ALT 和 AST 存在于肝脏细胞中, 当肝功能受损时则会被释放进入血液, 导致活力升高^[36]。本研究中, 摄食配合饲料的长江鲟亚成体血清 3 种酶活力均最高, 冰鲜鱼和两种混合饵料低于配合饲料但差异不显著, 而蚯蚓干投喂组显著低于配合饲料。中华鲟^[12]、大口黑鲈^[37]和吉富罗非鱼^[38](*Oreochromis niloticus*)的研究中也发现冰鲜鱼等生物饵料能够降低血清 AST、ALT 活力, 说明冰鲜鱼、蚯蚓干投喂能够改善长江鲟的肝脏健康状况。此外, 肝脏损伤会导致血清脂质含量降低^[39], 本研究配合饲料组血清脂质低也可能是肝脏损伤导致。血清 TP 和 ALB 含量通常与鱼体蛋白质合成相关, 膳食蛋白质摄入过量和不足都会导致其含量降低^[40,41]。本研究中, 投喂配合饲料的长江鲟亚成体血清 TP 和 ALB 含量最高, 混合饵料投喂也高于单独使用冰鲜鱼或蚯蚓干投喂。说明本研究配合饲料的蛋白质组成及含量比较适合长江鲟亚成体吸收, 这也可能是导致组间生长差异的原因。

3.4 不同饵料对长江鲟亚成体血清抗氧化及免疫指标的影响

鱼类在进行有氧代谢时会产生活性氧自由基, 含量过高时会导致氧化应激, 造成细胞损伤影响鱼体健康^[42]。抗氧化酶活性是动物免疫防御功能的关键指标^[43]。MDA 是脂质过氧化的主要产物^[44], T-AOC 是鱼体抗氧化能力的综合体现, SOD、CAT 和 GSH-Px 是缓解鱼类氧化应激的重要抗氧化酶^[45]。本研究中, 投喂配合饲料和混合饵料 2 的长江鲟亚成体表现出较高的 T-AOC 水平和 GSH-Px 活力。各处理组间 MDA 含量无显著差异, 但投喂配合饲料的长江鲟血清 MDA 含量稍高于其余组。

投喂混合饵料 1 的长江鲟亚成体血清 SOD 活力显著高于蚯蚓干及混合饵料 2。Li 等^[46]在俄罗斯鲟 (*Acipenser gueldenstaedtii*) 幼鱼的研究中, 发现使用植物混合油脂替代饲料中的鱼油能够提升抗氧化酶活力。因此推测, 本研究中配合饲料及混合饵料投喂的长江鲟亚成体抗氧化能力较高, 可能与饵料脂质来源相关。

补体系统和免疫球蛋白是鱼类免疫系统的重要组成部分, C3、C4 和 IgM 是补体系统及免疫球蛋白的主要成分, 具有补体防御、介导免疫、促进炎症反应和消除病原体等作用^[47]。Rufchaei 等^[48]研究发现在基础饲料中添加蚯蚓提取物会增加里海拟鲤 (*Rutilus caspicus*) 血清免疫球蛋白含量, 提升其免疫能力。Ye 等^[49]研究发现投喂冰鲜杂鱼使得杂交石斑鱼血清 C4 和 IgM 水平显著升高。本研究中, 投喂冰鲜鱼和 2 组混合饵料的长江鲟亚成体血清 C3 含量较高, 投喂配合饲料、蚯蚓干和混合饵料 2 的长江鲟表现出较高的血清 C4 水平, 各组 IgM 含量无显著差异, 但混合饵料 1 的 IgM 含量略高于其他组。其中 C3、C4 的差异可能与饵料成分、免疫途径激活、营养吸收差异等因素密切相关。本研究投喂冰鲜鱼、蚯蚓干及混合饵料能够刺激长江鲟亚成体的非特异性免疫能力, 其中含有蚯蚓干的混合饵料综合表现最佳。

4 结论

在本实验条件下, 投喂配合饲料的长江鲟亚成体在生长性能、蛋白质吸收和抗氧化能力上具有优势, 但可能会增加鱼体的代谢负担, 影响其健康状况。冰鲜鱼投喂能够促进脂质吸收, 改善肝脏健康状况, 对雌性长江鲟亚成体血清 E₂ 调节有积极影响。蚯蚓干相比冰鲜鱼, 对雄性长江鲟血清 T 含量的调节作用较为明显。配合饲料与冰鲜鱼混合投喂在性激素合成和肝脏健康状况上优于配合饲料, 但与冰鲜鱼相比未表现出显著优势。配合饲料与蚯蚓干混合投喂能够提高长江鲟亚成体抗氧化及免疫能力。因此, 在长江鲟亚成体养殖过程中可以通过添加冰鲜鱼或蚯蚓干改善健康状况, 促进性激素合成。也可以参考冰鲜鱼与蚯蚓干的营养组成研发适合长江鲟亚成体的专

用饲料, 促进长江鲟人工养殖的可持续发展。

参考文献:

- [1] Chen X H. Biology and resource status of sturgeon fishes[M]. Beijing: Ocean Press, 2007. [陈细华. 鲟形目鱼类生物学与资源现状[M]. 北京: 海洋出版社, 2007.]
- [2] Zhang H, Wei Q W, Du H, et al. Present status and risk for extinction of the Dabry's sturgeon (*Acipenser dabryanus*) in the Yangtze River watershed: A concern for intensified rehabilitation needs[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2011, 27(2): 181-185.
- [3] Li J Y, Wang C Y, Pan W W, et al. Migration and distribution of adult hatchery reared Yangtze sturgeons (*Acipenser dabryanus*) after releasing in the Upper Yangtze River and its implications for stock enhancement[J]. Journal of Applied Ichthyology, 2021, 37(1): 3-11.
- [4] Li Y L, Zhang T, Feng G P, et al. Study on hematological indexes of candidate broodstock of cultured *Acipenser dabryanus*[J]. Fisheries Science & Technology Information, 2024, 51(1): 15-21. [李远兰, 张涛, 冯广朋, 等. 人工养殖长江鲟后备亲本血液生化指标研究[J]. 水产科技情报, 2024, 51(1): 15-21.]
- [5] Li P C, Wu J M, Li J Y, et al. The characteristics and effect of natural reproductive behavior of Yangtze River sturgeon under the creation of spawning habitat in natural waterbody[J]. Scientia Sinica (Vita), 2025, 55(2): 366-374. [李鹏程, 吴金明, 李君轶, 等. 天然水域产卵生境营造下长江鲟自然繁殖行为特征及效果[J]. 中国科学: 生命科学, 2025, 55(2): 366-374.]
- [6] Li Q F, Qu H T, Hu Y C, et al. Dietary lipid affects growth, feed utilization, liver histology and physiological biochemistry of juvenile Yangtze sturgeon, *Acipenser dabryanus*, an endangered sturgeon in the Yangtze River[J]. Aquaculture Research, 2022, 53(17): 5946-5956.
- [7] Du H, Luo J, Zhou L, et al. Technologies for reproduction of the third generation of *Acipenser dabryanus* in captive[J]. Sichuan Journal of Zoology, 2020, 39(2): 197-203. [杜浩, 罗江, 周亮, 等. 长江鲟子三代繁育技术研究[J]. 四川动物, 2020, 39(2): 197-203.]
- [8] Chen H, Wang M, Li Y, et al. Using the transcriptome to evaluate the best reference genes for studying nutrition of the critically endangered Yangtze sturgeon (*Acipenser dabryanus*)[J]. Aquaculture, 2021, 543: 736894.
- [9] Wu J P, Xiong W, Liu W, et al. The effects of dietary n-3 highly unsaturated fatty acids on growth, antioxidant capacity, immunity, and oxylipin profiles in *Acipenser dabryanus*[J]. Antioxidants, 2024, 13(4): 421.
- [10] Liu L J, Peng K. Research progress on substitution of iced trash fish with aquatic compound feed[J]. Feed Research, 2021, 44(21): 141-144. [刘丽杰, 彭凯. 水产配合饲料替代

- 冰鲜杂鱼的研究进展[J]. 饲料研究, 2021, 44(21): 141-144.]
- [11] Shao J J, Zhong L Q, Zhu Y X, et al. Effects of formulated feed and chilled trash fish on growth performance and meat quality of largemouth bass *Micropterus salmoides*[J]. Fisheries Science, 2023, 42(1): 81-88. [邵俊杰, 钟立强, 朱昱璇, 等. 配合饲料和冰鲜鱼对大口黑鲈生长和品质的影响[J]. 水产科学, 2023, 42(1): 81-88.]
- [12] Zhou Y, Tong S, Zhou Q, et al. Different diets on the postpartum recovery of the offspring Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*)[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2024, 48(10): 1680-1687. [周越, 仝爽, 周青, 等. 不同饵料对子一代中华鲟产后亲鱼康复效果的影响[J]. 水生生物学报, 2024, 48(10): 1680-1687.]
- [13] Hasan B, Iriani D, Warningsih T, et al. The effect of diets supplemented with different natural foods on growth and feed utilization of snakehead (*Channa striata*)[J]. BIO Web of Conferences, 2023, 74: 01023.
- [14] Zhong J, You H H, Zhou Q B, et al. The effects of earthworms on growth and digestive enzyme activity of rice field eel[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2016, 38(2): 370-375. [钟杰, 游海辉, 周秋白, 等. 饲料中添加蚯蚓对黄鳝生长及消化酶活力的影响[J]. 江西农业大学学报, 2016, 38(2): 370-375.]
- [15] Hu S R, Yang X, Long M Z, et al. Effects of different feeding amount of earthworms on the growth of sturgeon[J]. Scientific Fish Farming, 2016(3): 70-71. [胡世然, 杨兴, 龙明珠, 等. 蚯蚓不同添饲量对鲟鱼生长的影响[J]. 科学养鱼, 2016(3): 70-71.]
- [16] Gong Q, Liu Y, Lai J S, et al. Effects of initial feeding on growth of *Acipenser dabryanus dumeril*[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2015, 28(5): 2297-2300. [龚全, 刘亚, 赖见生, 等. 不同开口饵料对达氏鲟鱼苗生长的影响[J]. 西南农业学报, 2015, 28(5): 2297-2300.]
- [17] Schulz C, Günther S, Wirth M, et al. Growth performance and body composition of Pike perch (*Sander lucioperca*) fed varying formulated and natural diets[J]. Aquaculture International, 2006, 14(6): 577-586.
- [18] Zheng Y P, Liu J H, Xu J N, et al. Comparison of artificial feed and natural food by the growth and blood biochemistry in Chinese sturgeon *Acipenser sinensis*[J]. Fishes, 2023, 8(1): 45.
- [19] Xu X X, Ji B B, Lu R H. Application of earthworm in aquatic feed[J]. Feed Industry, 2024, 45(2): 25-30. [徐歆歆, 纪贝贝, 卢荣华. 蚯蚓在水产饲料中的应用研究[J]. 饲料工业, 2024, 45(2): 25-30.]
- [20] 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.
- [21] Mohanta K N, Subramanian S, Korikanthimath V S. Potential of earthworm (*Eisenia foetida*) as dietary protein source for rohu (*Labeo rohita*) advanced fry[J]. Cogent Food & Agriculture, 2016, 2(1): 1138594.
- [22] Shiau S Y, Yu Y P. Dietary supplementation of chitin and chitosan depresses growth in tilapia, *Oreochromis niloticus* × *O. aureus*[J]. Aquaculture, 1999, 179(1-4): 439-446.
- [23] Walker W H, Cooke P S. Functions of steroid hormones in the male reproductive tract as revealed by mouse models[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(3): 2748.
- [24] Zhang T, Zhang L Z, Zhao F, et al. The difference of plasma sex steroid levels and discriminant analysis of males and females in different ovarian developmental stages in cultured *Acipenser baerii baerii*[J]. Marine Fisheries, 2008, 30(1): 19-25. [张涛, 章龙珍, 赵峰, 等. 西伯利亚鲟不同性别与卵巢发育时期血液性类固醇激素的差异与判别分析[J]. 海洋渔业, 2008, 30(1): 19-25.]
- [25] Xu A. The influence on serum biochemical indices and reproductive performance of sturgeon by different levels feed of ice fresh fish and cellulose[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2014. [徐翱. 饲料中添加不同比例冰鲜鱼、纤维素对鲟亲鱼血清生化指标及繁殖性能的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2014.]
- [26] Wu J P, Yang D Q, Du H, et al. The influence of dietary arachidonic acid on growth, fatty acid profile and sex steroid hormones of F₂ generation Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*)[J]. Aquaculture Reports, 2021, 21: 100818.
- [27] Xu Y Q, Li W F, Ding Z K. Polyunsaturated fatty acid supplements could considerably promote the breeding performance of carp[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2017, 119(5): 1600183.
- [28] Xiang X, Chen J, Zhou X H, et al. Effects of five lipid sources on growth performance and serum biochemical indices of *Schizothorax prenanti*[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2010, 22(2): 498-504. [向泉, 陈建, 周兴华, 等. 5 种脂肪源对齐口裂腹鱼生长性能及血清生化指标的影响[J]. 动物营养学报, 2010, 22(2): 498-504.]
- [29] Castro C, Corraze G, Firmino-Diôgenes A, et al. Regulation of glucose and lipid metabolism by dietary carbohydrate levels and lipid sources in gilthead sea bream juveniles[J]. The British Journal of Nutrition, 2016, 116(1): 19-34.[PubMed]
- [30] Zhang Y, Xie K, Shi Y, et al. Dietary protein and lipid level on growth, serum biochemical index and liver antioxidant capacity of juvenile Asian red-tailed catfish(*Hemibagrus wyckioides*)[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2024, 48(6): 968-978. [张姚铮泰, 谢凯, 石勇, 等. 饲料蛋白质和脂肪水平对丝尾鲮幼鱼生长、血清生化指标及肝脏抗氧化能力的影响[J]. 水生生物学报, 2024, 48(6): 968-978.]
- [31] Wu J P, Liu Y, Wang Y Q, et al. The influence of dietary n-3 highly unsaturated fatty acids on growth, fatty acid profile,

- lipid metabolism, inflammatory response, and intestinal microflora in F₂ generation female Yangtze sturgeon (*Acipenser dabryanus*)[J]. *Animals*, 2024, 14(23): 3523.
- [32] He Q, Wang L, Duan H Q, et al. Effects of *Bacillus subtilis* and *Enterococcus faecalis* on growth performance, serum biochemical indices and intestinal microflora of *Carassius auratus*[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 39(1): 142-147. [何琴, 王利, 段荟芹, 等. 枯草芽孢杆菌和粪肠球菌对鲫鱼生长性能、血清学指标和肠道微生物多样性的影响[J]. *江苏农业学报*, 2023, 39(1): 142-147.]
- [33] Wilson R P. Utilization of dietary carbohydrate by fish[J]. *Aquaculture*, 1994, 124(1-4): 67-80.
- [34] Qu H T, Ke W, Wen Z H, et al. Effects of dietary carbohydrate on growth, feed utilization, hepatic glucose and lipid metabolism in endangered Yangtze sturgeon (*Acipenser dabryanus*)[J]. *Aquaculture Reports*, 2022, 26: 101334.
- [35] Al-Khshali M S, Hasan A H. Some physiological changes (ALP, AST and ALT) of common carp (*Cyprinus carpio*) caused by high salinity[J]. *Biochemical & Cellular Archives*, 2019, 19(2): 4605-4610.
- [36] Zhou Y, Wang W L, Li S L, et al. Effect of dietary choline level on growth performance, body composition and serum antioxidant activity of juvenile largemouth bass(*Micropterus salmoides*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2022, 46(2): 224-237. [周越, 王伟隆, 李松林, 等. 饲料中胆碱对大口黑鲈幼鱼生长性能、体成分和血清抗氧化机能的影响[J]. *水产学报*, 2022, 46(2): 224-237.]
- [37] Mou M M, Jiang Y, Luo Q, et al. Effects of formulated diet and fresh frozen *Hypophthalmichthys molitrix* on growth, plasma biochemical index and antioxidant ability and histology of *Micropterus salmoides*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(9): 1408-1416. [牟明明, 蒋余, 罗强, 等. 配合饲料和冰鲜鲢对大口黑鲈生长、血浆生化指标、抗氧化能力和组织学的影响[J]. *水产学报*, 2018, 42(9): 1408-1416.]
- [38] Bai F J, Luo L, Huang X Z, et al. Comparative study on effects of silkworm pupal oil and other six kinds of lipid on growth, body composition and lipid metabolism of GIFT *Oreochromis niloticus*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2017, 41(2): 258-270. [白富瑾, 罗莉, 黄先智, 等. 蚕蛹油等7种油脂对吉富罗非鱼生长、体组成及脂质代谢影响的比较[J]. *水产学报*, 2017, 41(2): 258-270.]
- [39] Cong L M, Wang W F, Gao C R, et al. Effects of compound diet and fresh frozen *Ammodytes personatus* on growth, antioxidant ability and lipid metabolism of hybrid grouper(*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂) juveniles[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2016, 40(9): 1398-1407. [丛林梅, 王蔚芳, 高淳仁, 等. 配合饲料和冰鲜太平洋玉筋鱼对珍珠龙胆石斑鱼幼鱼生长、抗氧化和脂质代谢的影响[J]. *水产学报*, 2016, 40(9): 1398-1407.]
- [40] Akrami R, Gharai A, Mansour M R, et al. Effects of dietary onion (*Allium cepa*) powder on growth, innate immune response and hemato-biochemical parameters of *Beluga* (*Huso huso* Linnaeus, 1754) juvenile[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2015, 45(2): 828-834.
- [41] Li P Y, Song Z D, Huang L, et al. Effects of dietary protein and lipid levels in practical formulation on growth, feed utilization, body composition, and serum biochemical parameters of growing rockfish *Sebastes schlegelii*[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2023, 2023(1): 9970252.
- [42] Song C Y, Sun C X, Liu B, et al. Oxidative stress in aquatic organisms[J]. *Antioxidants*, 2023, 12(6): 1223.
- [43] Mi J L, Lu R H, Yan X, et al. Evaluating the mixture of earthworm meal and wormcast as a protein source for common carp (*Cyprinus carpio* L.) based on growth performance, antioxidant, immune capacity, lipid metabolism and intestinal health[J]. *Aquaculture Reports*, 2022, 24: 101118.
- [44] Del Rio D, Stewart A J, Pellegrini N. A review of recent studies on malondialdehyde as toxic molecule and biological marker of oxidative stress[J]. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 2005, 15(4): 316-328.
- [45] Saleh N E, Mourad M M, El-Banna S G, et al. Soybean protein concentrate as a fishmeal replacer in weaning diets for common sole (*Solea solea*) post-larvae: Effects on the growth, biochemical and oxidative stress biomarkers, and histopathological investigations[J]. *Aquaculture*, 2021, 544: 737080.
- [46] Li Q, Zhu H Y, Wei J J, et al. Effects of dietary lipid sources on growth performance, lipid metabolism and antioxidant status of juvenile Russian sturgeon *Acipenser gueldenstaedtii*[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2017, 23(3): 500-510.
- [47] Magnadottir B, Lange S, Gudmundsdottir S, et al. Ontogeny of humoral immune parameters in fish[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2005, 19(5): 429-439.
- [48] Rufchaei R, Hoseinifar S H, Nedaei S, et al. Non-specific immune responses, stress resistance and growth performance of Caspian roach (*Rutilus caspicus*) fed diet supplemented with earthworm (*Eisenia foetida*) extract[J]. *Aquaculture*, 2019, 511: 734275.
- [49] Ye G L, Dong X H, Yang Q H, et al. A formulated diet improved digestive capacity, immune function and intestinal microbiota structure of juvenile hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂) when compared with chilled trash fish[J]. *Aquaculture*, 2020, 523: 735230.[LinkOut]

Effects of different diets on the growth, hormone synthesis, and health status of juvenile Yangtze sturgeon (*Acipenser dabryanus*)

WANG Yuqi^{1,2}, FU Peng³, WU Jinping², ZHANG Chuang³, SHEN Li², LENG Xiaoqian², LI Luoxin², LIU Zhigang², LUO Jiang², DU Hao^{1,2*}

1. College of Fisheries, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;

2. Key Laboratory of Freshwater Biodiversity Conservation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Yangtze River Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuhan 430223, China;

3. Chongqing Fisheries Research Institute, Chongqing 400020, China

Abstract: The natural population of Yangtze sturgeon (*Acipenser dabryanus*) has been declared extinct; therefore, the species is sustained by artificial breeding. Nutritional challenges are a significant obstacle in current conservation efforts for *A. dabryanus*. The number of adult sturgeons available for breeding is limited each year, and gonadal development remains a critical issue. To investigate the effects of different feeds on the growth performance, hormone synthesis, and health status of juvenile Yangtze sturgeon, 90 juvenile sturgeons aged 4–6 years with an average weight of (8.46±1.64) kg were randomly assigned to five groups and fed with for one year with one of the following: compound feed, frozen fish, dried earthworm, mixed feed 1 (compound feed and frozen fish), or mixed feed 2 (compound feed and dried earthworm). The results showed that (1) the growth rate (WGR), specific growth rate (SGR), and body length growth rate (LGR) of juvenile sturgeon fed with compound feed were significantly higher than those of the other groups ($P<0.05$), while the growth indicators of juvenile sturgeon fed with mixed feeds were intermediate between the compound feed group and biological feed groups. (2) The serum E₂ levels of female juvenile sturgeon fed with frozen fish, mixed feed 1, and dried earthworm were significantly higher, while the serum T levels of male juvenile sturgeon in the dried earthworm group and both mixed feed groups were significantly elevated. Additionally, the serum lipid levels of juvenile sturgeon fed with frozen fish, dried earthworm, and mixed feeds were significantly higher ($P<0.05$). (3) The serum alanine transaminase (ALT), aspartate transaminase (AST) activities, and total protein (TP) and albumin (ALB) levels in juvenile sturgeon fed with compound feed were significantly higher than those of the other groups ($P<0.05$). (4) The total antioxidant capacity (T-AOC) and glutathione peroxidase (GSH-Px) activity in the serum of juvenile sturgeon fed with compound feed and mixed feed 2 were significantly higher than in other groups ($P<0.05$). In contrast, mixed feed 1 resulted in significantly higher serum superoxide dismutase activity than the dried earthworm and mixed feed 2 groups. (5) The serum C3 levels of juvenile sturgeon fed with frozen fish and both mixed feeds were significantly higher than those of the compound feed and dried earthworm groups ($P<0.05$). In comparison, the serum C4 levels were higher in the groups fed with compound feed, dried earthworm, and mixed feed 2. The results indicated that juvenile sturgeon fed with compound feed showed advantages in growth performance, protein absorption, and antioxidant capacity. In contrast, frozen fish, dried earthworm, and mixed feeds promoted hormone synthesis, lipid absorption, and liver health. Among them, the combination of compound feed and dried earthworm resulted in the best overall performance in hormone synthesis, liver health, antioxidant defense, and immune response. This study provides useful insights into the feeding strategies for artificially cultured juvenile Yangtze sturgeon and can inform the development of specialized feeds for sturgeon, drawing on the nutritional composition of frozen fish and dried earthworm and the metabolic characteristics of juvenile sturgeon. These findings have significant implications for the nutritional regulation strategies of candidate broodstock for the *A. dabryanus* and lay the foundation for the large-scale artificial propagation of this species.

Key words: *Acipenser dabryanus*; juvenile; compound feed; frozen fish; dried earthworms; growth performance; hormone synthesis; health status

Corresponding author: DU Hao. E-mail: duhao@yfi.ac.cn