

DOI: 10.12264/JFSC2025-0153

## 饲料中添加 DMPT 对中华鲟幼鱼生长、免疫和消化能力的影响

程超, 张建明, 舒婷婷, 曲焕韬, 张德志, 姜伟\*, 杨菁\*

三峡工程鱼类资源保护湖北省重点实验室(中国长江三峡集团有限公司中华鲟研究所), 湖北 宜昌 443100

**摘要:** 为探究饲料中添加 DMPT (dimethyl- $\beta$ -propiothetin, 二甲基- $\beta$ -丙酸噻亭)对中华鲟(*Acipenser sinensis*)幼鱼生长、血清免疫、肠道消化酶活性及肠道菌群组成的影响, 在基础饲料中添加 0、400、800、1600 mg/kg 的 DMPT, 分别记作 CK (对照)、A1、A2、A3 组。用这 4 种实验饲料投喂初始体重为(300.88 $\pm$ 17.64) g 的子二代中华鲟幼鱼 5 周, 每种饲料投喂 3 个重复组, 每个重复组 10 尾鱼。结果表明, A1、A2、A3 组中华鲟幼鱼的增重率和特定增长率显著高于 CK 组( $P<0.05$ ), A3 组的饲料系数显著低于 CK 组( $P<0.05$ )。血清免疫球蛋白 M、补体 C3、补体 C4 含量、溶菌酶活性均随着添加量的增加呈现不断升高的趋势, 且 A2 和 A3 组均显著高于 CK 组。三个处理组的血清超氧化物歧化酶活性显著低于 CK 组( $P<0.05$ ); A2 和 A3 组碱性磷酸酶活性显著高于 CK 组( $P<0.05$ )。蛋白酶、脂肪酶、淀粉酶活性随着添加量的增加呈现先升高后降低的趋势。A1 和 A2 组蛋白酶、脂肪酶活性均显著高于 CK 组; 三个处理组淀粉酶活性显著高于 CK 组。3 个处理组肠道菌群的 ACE、Chao1、Shannon、Simpson 指数与 CK 组之间无显著差异( $P>0.05$ ); A2 和 A3 组的 PD\_whole\_tree 指数显著高于 CK 组。门水平上, 各组中华鲟幼鱼肠道绝对优势菌门为梭杆菌门, 次级优势菌门为变形菌门和厚壁菌门, 且随着 DMPT 添加量的增加梭杆菌门的相对丰度呈现先降低后升高的趋势。属水平上, 各组中华鲟幼鱼肠道绝对优势菌属为鲸杆菌属(*Cetobacterium*), 且其相对丰度随着 DMPT 添加量的增加呈现升高的趋势。A2 和 A3 组的肝脏 *GHR* 基因表达量显著高于 CK 组; A3 组的 *IGF-1*、*IGF-2* 基因表达量显著高于 CK 组。*GHR*、*IGF-1*、*IGF-2* 基因表达量随着 DMPT 添加量的增加呈现不断升高的趋势。综上所述, 饲料中添加适量的 DMPT 能够显著提升中华鲟幼鱼的生长性能, 提高免疫能力和消化能力。在本研究设定的 4 个添加梯度中, 1600 mg/kg 为促进中华鲟幼鱼生长与健康的最适添加量。该添加量能够有效提高肝脏生长相关基因的表达, 进而促进鱼体的生长; 同时, 该剂量组关键免疫指标均显著优于对照组及低剂量组。饲料中添加 DMPT 虽不影响中华鲟幼鱼肠道菌群的物种丰富度和多样性, 但能增加优势菌门和菌属的相对丰度, 从而对提升鱼体生长性能、维护肠道健康及增强抗病能力发挥积极作用。

**关键词:** DMPT; 中华鲟; 生长; 免疫; 消化酶; 肠道菌群; 基因表达

中图分类号: S963

文献标志码: A

文章编号: 1005–8737–(2025)12–1786–12

中华鲟(*Acipenser sinensis*)是长江的旗舰物种, 被誉为“长江鱼王”, 它还是一种稀有的“活化石”, 其历史可以追溯到 1.5 亿年前的中生代。中华鲟是一种大型溯河洄游鱼类, 主要分布在长江和近海流域, 是国家一级重点野生保护动物, 被列为世界自然保护联盟濒危物种红色名录中的极危物

种<sup>[1]</sup>。目前, 增殖放流是保护中华鲟种群最有效、最直接的手段, 但通过全人工繁殖技术繁殖的子二代中华鲟苗种质量较野生群体偏差, 主要体现在生长速度慢、摄食效率低、抗逆性差等方面<sup>[2]</sup>。

研究表明, 诱食剂能够改善饲料适口性和引诱性, 提高饲料效率, 促进鱼类生长<sup>[3]</sup>。二甲基- $\beta$ -

收稿日期: 2025-06-05; 修订日期: 2025-06-23.

基金项目: 湖北省自然科学基金创新群体项目(2024AFA036); 三峡集团项目(WWKY-2021-0351); 湖北省自然科学基金项目(2023AFD182).

作者简介: 程超, 男, 硕士研究生, 工程师, 主要从事珍稀特有鱼类的健康养殖技术研究. E-mail: 1047622191@qq.com

\*通信作者: 姜伟, 男, 正高级工程师, 主要从事渔业资源与水生态修复方面研究. E-mail: Jiang\_wei6@ctg.com.cn

杨菁, 女, 高级工程师, 主要从事中华鲟遗传保护研究. E-mail: yang\_jing7@ctg.com.cn

丙酸噻亭(dimethyl- $\beta$ -propiothetin, DMPT)又称为硫代甜菜碱,是广泛存在于海藻和部分盐生植物体内的活性甲基类物质。在鱼类养殖中,DMPT作为一种诱食剂,已被证明对鱼类的生长性能、免疫反应和肠道消化功能具有积极的影响。关于DMPT对鱼类诱食作用的研究已经有很多报道。饲料中添加0.2%的DMPT时,太门哲罗鱼(*Hucho taimen*)的增重率和摄食率显著高于CK组<sup>[4]</sup>。张宝彤等<sup>[5]</sup>发现在饲料中添加DMPT不仅能够提高草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)的生长性能,还对脂肪代谢和非特异性免疫有显著的提升。肠道微生物影响鱼类的摄食、生长、代谢以及免疫,肠道微生物菌群的动态平衡以及正常分布是鱼类健康生长的重要基础<sup>[6]</sup>。研究表明鱼类肠道微生物菌群组成与环境因子有着密切的联系,如温度、食物组成、水深等,其中食物组成对肠道微生物菌群的影响十分明显<sup>[7]</sup>。高彤等<sup>[8]</sup>发现饲料中添加诱食剂能够明显提高凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)肠道菌群的物种多样性水平。

DMPT作为诱食剂应用于鲟形目鱼类的报道并不多见,研究表明,饲料中添加适量的DMPT对施氏鲟有着较好的诱食效果,可显著提升其生长性能和消化酶活性<sup>[9-10]</sup>。但关于DMPT对中华鲟影响的研究未见报道。本研究旨在探究饲料中添加不同剂量的DMPT对中华鲟幼鱼生长性能、血清免疫、消化酶活性及肠道菌群组成的影响,确定中华鲟幼鱼饲料中DMPT的最适添加量,为进一步提升中华鲟幼鱼摄食效率提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 实验材料

实验用鱼来自中国长江三峡集团有限公司中华鲟研究所,通过人工催产、干法受精及流水孵化等方式在2022年10月获得中华鲟仔鱼。2023年7月,选取规格一致,健康无伤的9月龄中华鲟150余尾。中华鲟幼鱼置于流水养殖系统中暂养2周,养殖容器为直径1 m,高0.5 m的圆柱形玻纤维缸。暂养期间日投喂量按照鱼体重的1.0%进行投喂,分2次进行投喂。DMPT购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司,含量98%。

### 1.2 实验设计

实验共分为4个组,在基础饲料中添加0、400、800、1600 mg/kg的DMPT,分别记作CK(对照)、A1、A2、A3组,每组设置3个重复组,每组10尾幼鱼。基础日粮为广东越群海洋生物科技股份有限公司源牌鲟鱼苗料,该饲料粗蛋白 $\geq 46\%$ 、粗脂肪 $\geq 8\%$ 、粗灰分 $\leq 16\%$ 、水分 $\leq 10\%$ 。将基础日粮粉碎,采用逐次增量的等量递增混合方法将DMPT添加到基础日粮中,再重新放入制粒机中制粒。采用气相色谱法<sup>[11]</sup>测定4种饲料样品中DMPT含量,得出CK、A1、A2、A3组DMPT含量分别为4.80、379.53、754.28、1544.69 mg/kg。

### 1.3 饲养管理

开始实验前用CK组饲料预饲两周,随后停食48 h,挑选均匀健康的鱼按实验设计进行分组,实验共进行5周。每天饲喂两次,日投喂量为鱼体体重的1%,每周调整一次投喂量。实验用水为地下井水,水温保持在 $(22.0\pm 0.5)$  °C,配备充氧装置,溶解氧含量稳定保持在6 mg/L以上。

### 1.4 样品采集与测定

**1.4.1 生长参数的测定** 在实验结束时,对所有实验鱼进行禁食处理24 h,以确保胃内容物排空。随后,使用电子天平精确测量每条鱼的体重、体长。解剖鱼体,取出肝脏称重。同时,统计实验期间各组投喂的饲料总量。实验鱼的初末体重(g)的测量及增重率(WGR, %)、特定增长率(SGR, %/d)、肥满度(CF, g/cm<sup>3</sup>)、存活率(SR, %)、肝体指数(HIS, %)、饲料系数(FCR)等的计算参考周东来等<sup>[12]</sup>的方法。

**1.4.2 血清免疫指标的测定** 采用尾静脉采血的方法收集血液样本。将采集的血液置于离心管中,在4 °C下以3000 r/min离心10 min分离出血清并转移至新的离心管中,保存在-80 °C冰箱中备用。使用酶联免疫吸附测定(ELISA)试剂盒,严格按照试剂盒的说明,测定血清中补体蛋白3(C3)、补体蛋白4(C4)、超氧化物歧化酶(SOD)、碱性磷酸酶(ALP)、免疫球蛋白M(IgM)、溶菌酶(LYS)的含量。试剂盒购置于上海酶联生物科技有限公司。

**1.4.3 肠道消化酶活性的测定** 解剖鱼体获取肠道组织,用预冷的生理盐水冲洗干净,去除内容物。将肠道组织剪成小段,放入匀浆器中,加入适量的预冷生理盐水,制备成 10%的组织匀浆。将匀浆液在 4 °C 下以 3000 r/min 离心 15 min,取上清液用于测定蛋白酶(protease)、淀粉酶(amylase)、脂肪酶(lipase)的活性。试剂盒购置于上海酶联生物科技有限公司。

**1.4.4 肠道微生物的测定** 使用 TGuide S96 磁珠法粪便基因组 DNA 提取试剂盒进行微生物总 DNA 提取。提取样品总 DNA 后,根据保守区设计得到引物,在引物末端加上测序接头,进行 PCR 扩增并对其产物进行纯化、定量和均一化形成测序文库,建好的文库先进行文库质检,质检合格的文库用 Illumina NovaSeq 6000 进行高通量测序。对测序数据进行质量控制和预处理,然后使用 QIIME2 软件进行生物信息学分析,包括计算  $\alpha$  多样性指数(如 ACE 指数、Chao1 丰富度指数、Shannon 多样性指数等)以及确定优势菌群结

构和相对丰度。

**1.4.5 基因表达水平的测定** 使用 TRIzol 试剂提取肝脏总 RNA,将其反转录成 cDNA。根据 NCBI 已知生长激素受体(GHR)、胰岛素样生长因子 1(IGF-1)、胰岛素样生长因子 2(IGF-2)、 $\beta$ -肌动蛋白( $\beta$ -actin)序列(GenBank 数据库登录号 KP218614.1、MK028132.1、MK028133.1、KY457447.1)使用 Premier5.0 软件设计引物,由生工生物工程上海股份有限公司合成(表 1)。实时荧光定量 PCR (qRT-PCR)反应体系(15  $\mu$ L): cDNA 模板(10 倍稀释) 2.0  $\mu$ L, 预混料 2 $\times$ Universal Blue SYBR Green qPCR Master Mix 7.5  $\mu$ L, 2.5  $\mu$ mol/L 基因引物(上游+下游)各 1.5  $\mu$ L, 去核酸酶水 4.0  $\mu$ L。反应程序: 95 °C, 30 s 预变性; 95 °C, 15 s 变性, 60 °C 30 s 退火/延伸, 40 个循环; 熔解的反应条件为 65~95 °C, 读板 30 s 记录荧光量。所有 qRT-PCR 进行 3 次重复,以  $\beta$ -actin 为内参基因对得到的各样本的  $C_t$  值做均一化处理,使用  $2^{-\Delta\Delta C_t}$  方法进行相关基因定量。

表 1 荧光定量 PCR 引物信息

Tab. 1 Primer information for fluorescent quantitative PCR

引物名称 primer name	引物序列(5'-3') primer sequence (5'-3')	片段长度/bp fragment length	退火温度/°C annealing temperature
GHR-S	GCCTGAACATCAAGGACGACG	284	60
GHR-A	GCTCACCTGGGCATAGAAATCC		
IGF1-S	CTGTTAAGCCAGCCAAATCCTC	146	60
IGF1-A	CATTGGAAACTGGCAGGCTC		
IGF2-S	ACCATCGCCCTCACAGTCTACAT	116	60
IGF2-A	AAGCCTCTGTCACCACAAACGA		
$\beta$ -actin-S	GCTATGTACGTTGCCATCCAGG	220	60
$\beta$ -actin-A	CCGTGGTAGTGAAGCTGTAGCC		

## 1.5 数据分析

所有实验数据均以平均值 $\pm$ 标准差( $\bar{x} \pm SD$ )表示。采用 SPSS 21.0 统计软件进行数据分析,先对数据进行正态性检验和方差齐性检验。对于符合正态分布和方差齐性的数据,采用单因素方差分析(one-way ANOVA),然后进行 Duncan's 多重比较检验,以确定不同处理组之间的差异显著性。 $P < 0.05$  被认为具有统计学显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 饲料中添加 DMPT 对中华鲟幼鱼生长性能的影响

饲料中添加 DMPT 对中华鲟幼鱼生长性能的影响见表 2。A1、A2、A3 三个处理组的增重率和特定增长率均显著高于 CK 组( $P < 0.05$ ),且 A3 组显著高于 A1、A2 组( $P < 0.05$ )。A3 组的饲料系

表 2 饲料中添加 DMPT 对中华鲟幼鱼生长性能的影响

Tab. 2 Effects of dietary DMPT supplementation in feed on growth performance of juvenile *Acipenser sinensis*n=9;  $\bar{x}\pm SD$ 

项目 item	CK	A1	A2	A3
初始体重/g initial body mass	308.56±15.78	299.83±18.03	311.64±20.18	283.51±16.55
终末体重/g final body mass	389.43±22.16 <sup>a</sup>	395.56±20.56 <sup>ab</sup>	415.36±12.51 <sup>c</sup>	407.12±19.23 <sup>bc</sup>
增重率/% weight gain	26.27±1.01 <sup>a</sup>	32.16±1.27 <sup>b</sup>	33.64±4.74 <sup>b</sup>	43.87±1.42 <sup>c</sup>
特定增长率/% specific growth rate	0.78±0.02 <sup>a</sup>	0.93±0.03 <sup>b</sup>	0.96±0.12 <sup>b</sup>	1.21±0.03 <sup>c</sup>
饲料系数 feed coefficient	1.78±0.14 <sup>b</sup>	1.72±0.09 <sup>ab</sup>	1.61±0.21 <sup>ab</sup>	1.44±0.16 <sup>a</sup>
肝体指数/% liver body index	1.55±0.36	1.28±0.22	1.47±0.34	1.33±0.48
肥满度/(g/cm <sup>3</sup> ) relative fatness	0.61±0.04	0.57±0.05	0.59±0.05	0.57±0.02

注: 同行数据上标不同小写字母表示组间存在显著差异( $P<0.05$ ).Note: Different superscript letters in the same row indicate significant difference between groups ( $P<0.05$ ).

数显著低于 CK 组( $P<0.05$ ), 其他两个处理组与 CK 组无明显差异。三个处理组的肝体指数和肥满度与 CK 组无明显差异( $P>0.05$ )。

## 2.2 饲料中添加 DMPT 对中华鲟幼鱼血清免疫能力的影响

饲料中添加 DMPT 对中华鲟幼鱼血清免疫能力的影响见表 3。A2 和 A3 组的免疫球蛋白 M 含量和碱性磷酸酶活性显著高于 CK 组( $P<0.05$ ), A1 组与 CK 组之无显著差异。三个处理组的补体 C3 含量和溶菌酶活性均显著高于 CK 组( $P<0.05$ ), 且 A3 组显著高于其他两个处理组( $P<0.05$ )。三个处理组的补体 C4 含量均显著高于 CK 组( $P<0.05$ ), 且 A3 组显著高于 A1 组( $P<0.05$ )。血清免疫球蛋白 M、补体 C3、补体 C4 含量、溶菌酶活性均随着添加量的升高而升高。三个处理组的超氧化物歧化酶活性显著低于 CK 组( $P<0.05$ ), 且 A2 和 A3 组显著低于 A1 组( $P<0.05$ )。

## 2.3 饲料中添加 DMPT 对中华鲟幼鱼肠道消化酶活性的影响

饲料中添加 DMPT 对中华鲟幼鱼肠道消化酶活性的影响见表 4。A1 和 A2 组蛋白酶活性显著高于 CK 组( $P<0.05$ ), A3 组与 CK 组之间无显著差异。A1 和 A2 组脂肪酶活性显著高于 CK 组( $P<0.05$ ), 且 A1 组显著高于 A2 组( $P<0.05$ ), A3 组和 CK 组之间无显著差异。三个处理组淀粉酶活性显著高于 CK 组( $P<0.05$ ), 且 A1 组显著高于其他两个处理组( $P<0.05$ )。

## 2.4 饲料中添加 DMPT 对中华鲟幼鱼肠道菌群的影响

饲料中添加 DMPT 对中华鲟幼鱼肠道菌群  $\alpha$  多样性的影响见表 5。本实验中, 所有组的 Coverage 数值均接近 100%。A1、A2 和 A3 组的 ACE 指数、Chao1 指数、Shannon 指数、Simpson 指数和 CK 组之间无显著差异。A2 和 A3 组的

表 3 饲料中添加 DMPT 对中华鲟幼鱼血清免疫指标的影响

Tab. 3 Effects of dietary DMPT supplementation in feed on serum immune parameters of juvenile *Acipenser sinensis*n=9;  $\bar{x}\pm SD$ 

项目 item	CK	A1	A2	A3
免疫球蛋白 M/(ng/mL) immunoglobulin M	1975.16±345.85 <sup>a</sup>	2178.28±147.64 <sup>a</sup>	2679.21±259.06 <sup>b</sup>	2641.84±277.07 <sup>b</sup>
补体 C3/( $\mu$ g/mL) complement C3	103.82±20.05 <sup>a</sup>	148.09±11.78 <sup>b</sup>	157.03±9.65 <sup>b</sup>	175.06±7.07 <sup>c</sup>
补体 C4/( $\mu$ g/mL) complement C4	134.28±20.19 <sup>a</sup>	163.77±19.45 <sup>b</sup>	172.62±22.96 <sup>bc</sup>	193.95±14.16 <sup>c</sup>
超氧化物歧化酶/(U/mL) superoxide dismutase	233.80±16.84 <sup>c</sup>	193.73±8.30 <sup>b</sup>	166.14±6.88 <sup>a</sup>	149.69±16.83 <sup>a</sup>
溶菌酶/(U/L) lysozyme	4.75±0.81 <sup>a</sup>	8.63±0.49 <sup>b</sup>	9.14±0.47 <sup>b</sup>	10.48±0.76 <sup>c</sup>
碱性磷酸酶/(IU/mL) alkaline phosphatase	158.30±12.04 <sup>a</sup>	151.34±17.07 <sup>a</sup>	186.80±22.60 <sup>b</sup>	205.97±9.31 <sup>b</sup>

注: 同行数据上标不同小写字母表示组间存在显著差异( $P<0.05$ ).Note: Different superscript letters in the same row indicate significant difference between groups ( $P<0.05$ ).

表 4 饲料中添加 DMPT 对中华鲟幼鱼肠道消化酶活性的影响

Tab. 4 Effects of dietary DMPT supplementation in feed on digestive enzyme activities of juvenile *Acipenser sinensis*n=9;  $\bar{x}\pm SD$ 

项目 item	CK	A1	A2	A3
蛋白酶/(U/mL) protease	772.02±140.38 <sup>a</sup>	1228.37±168.22 <sup>b</sup>	1038.84±134.78 <sup>b</sup>	818.71±129.60 <sup>a</sup>
脂肪酶/(U/L) lipase	413.95±94.14 <sup>a</sup>	700.76±45.72 <sup>c</sup>	606.81±74.15 <sup>b</sup>	437.07±8.91 <sup>a</sup>
淀粉酶/(IU/L) amylase	207.21±20.15 <sup>a</sup>	391.14±42.74 <sup>c</sup>	326.35±37.82 <sup>b</sup>	295.07±40.15 <sup>b</sup>

注: 同行数据上标不同小写字母表示组间存在显著差异( $P<0.05$ ).Note: Different superscript letters in the same row indicate significant difference between groups ( $P<0.05$ ).表 5 饲料中添加 DMPT 对中华鲟幼鱼肠道菌群  $\alpha$  多样性的影响Tab. 5 Effects of dietary DMPT supplementation in feed on alpha diversity of intestinal flora in juvenile *Acipenser sinensis*n=9;  $\bar{x}\pm SD$ 

项目 item	CK	A1	A2	A3
覆盖范围 coverage	0.99	1.00	0.99	1.00
ACE 指数 ACE index	1711.82±44.64	1717.06±124.56	1560.23±34.28	1653.74±50.54
Chao1 指数 Chao1 index	1668.35±82.96	1683.01±130.61	1497.63±41.45	1616.42±51.03
Simpson 指数 Simpson index	0.84±0.19	0.95±0.04	0.97±0.04	0.98±0.05
Shannon 指数 Shannon index	7.73±1.76	7.99±1.3	8.39±1.18	8.42±1.23
PD_whole_tree 指数 PD_whole_tree index	67.32±11.75 <sup>a</sup>	117.99±22.62 <sup>ab</sup>	136.01±24.15 <sup>b</sup>	144.84±31.95 <sup>b</sup>

注: 同行数据上标不同小写字母表示组间存在显著差异( $P<0.05$ ).Note: Different superscript letters in the same row indicate significant difference between groups ( $P<0.05$ ).

PD\_whole\_tree 指数显著高于 CK 组( $P<0.05$ ), 但 A1 组和 CK 组之间无显著差异。

饲料中添加 DMPT 对中华鲟幼鱼肠道菌群组成的影响见图 1、图 2。在门分类水平上, 各组中华鲟幼鱼肠道菌群的优势菌门相同, 但其相对丰度有差别。各组中华鲟幼鱼肠道菌群中的绝对优势菌门为梭杆菌门(Fusobacteriota), 且其相对丰度随着饲料中 DMPT 的添加量升高呈现先降低后升高

的趋势。各组间比较, A2 组梭杆菌门相对丰度最低, 占比为 27.28%; A3 组的最高, 占比为 36.28%。变形菌门(Proteobacteria)和厚壁菌门(Firmicutes)为各组肠道菌群中的次级优势菌门。各组间比较, A3 组变形菌门相对丰度最低, 占比为 12.20%; CK 组变形菌门相对丰度最高, 占比为 23.47%。A2 组厚壁菌门相对丰度最低, 占比为 13.82%; CK 组厚壁菌门相对丰度最高, 占比为 20.70%。

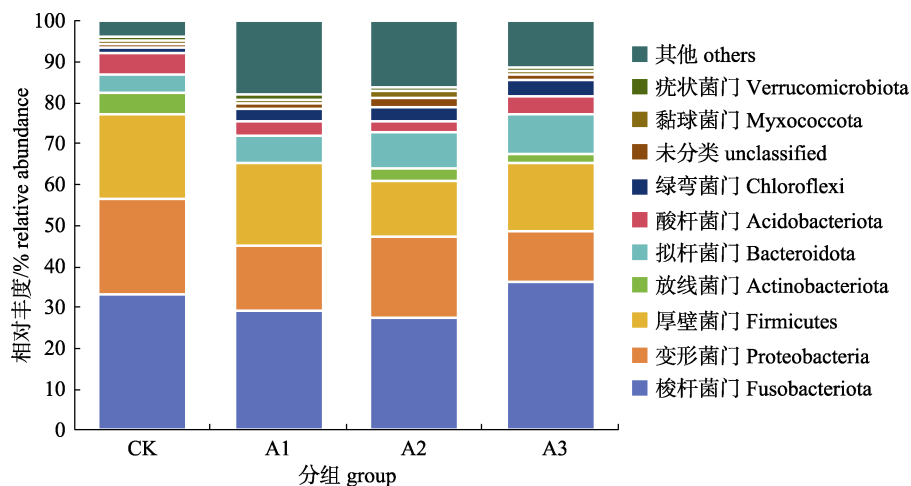


图 1 饲料添加 DMPT 对中华鲟幼鱼肠道菌群基于门水平的相对丰度的影响

Fig. 1 Effects of dietary DMPT supplementation in feed on the relative abundance of gut microbiota at phylum level in juvenile *Acipenser sinensis*

在属分类水平上, 各组中华鲟幼鱼肠道菌群中的绝对优势菌属为鲸杆菌属(*Cetobacterium*), 鲸杆菌属在 A3 组的相对丰度最高, 占比为 33.79%。CK 组和 A2 组的次级优势菌属依次为邻单胞菌属(*Plesiomonas*)和埃希氏-志贺氏菌属(*Escherichia\_Shigella*); A1 组次级优势菌属依次为邻单胞菌属和拟杆菌属(*Bacteroides*); A3 组次级优势菌属依次为拟杆菌属和邻单胞菌属。各组间比较, A3 组邻单胞菌属相对丰度最低, 占比为 4.38%; A2 组的相对丰度最高, 占比为 11.38%。拟杆菌属在 A3 组的相对丰度高于其在 A1 组, 占比为 8.29%。埃希氏-志贺氏菌属在 CK 组的相对丰度高于其在 A2 组, 占比为 5.89%。

### 2.5 饲料中添加 DMPT 对中华鲟幼鱼肝脏生长相关基因表达的影响

饲料中添加 DMPT 对中华鲟幼鱼肝脏生长相关基因表达的影响见图 3。*GHR*、*IGF-1*、*IGF-2* 基因表达量随着 DMPT 添加量的增加呈现不断升高的趋势。其中, A2 和 A3 组的 *GHR* 基因表达量显著高于 CK 组( $P<0.05$ ), A1 组和 CK 组之间未出现显著差异。A3 组的 *IGF-1*、*IGF-2* 基因表达量显著高于 CK 组( $P<0.05$ ), A1、A2 和 CK 组之间未出现显著差异。

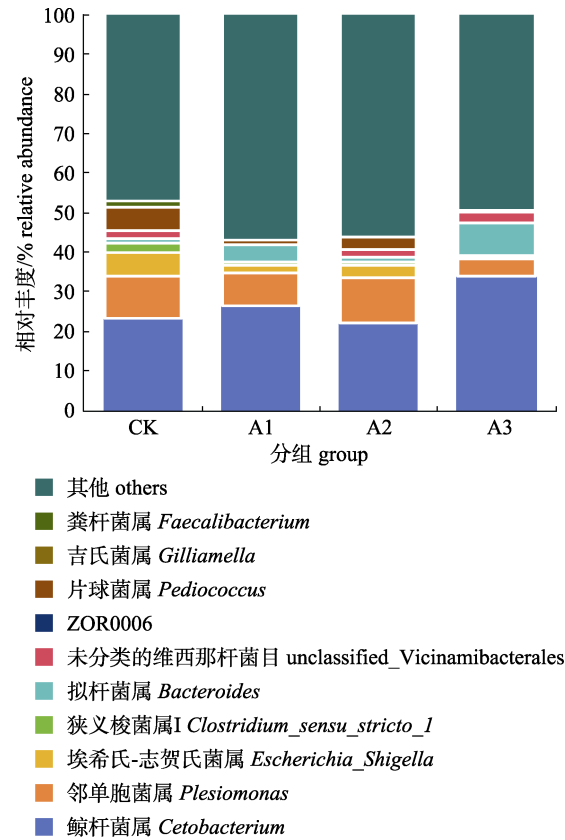


图 2 饲料添加 DMPT 对中华鲟幼鱼肠道菌群基于属水平的相对丰度的影响

Fig. 2 Effects of dietary DMPT supplementation in feed on the relative abundance of gut microbiota at genus level in juvenile *Acipenser sinensis*

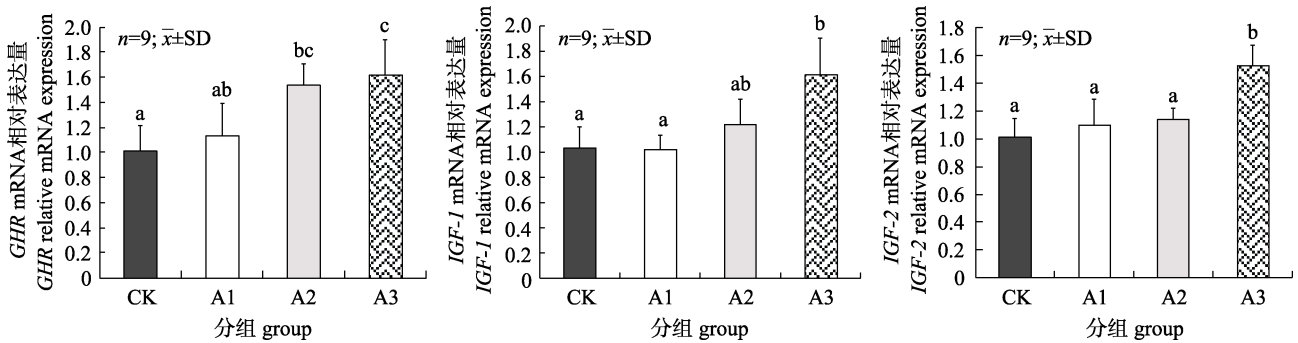


图 3 饲料中添加 DMPT 对中华鲟幼鱼肝脏生长相关基因表达的影响

柱形图上方不同小写字母表示组间差异显著( $P<0.05$ )。

Fig. 3 Effects of DMPT supplementation in feed on the expression of liver growth related genes in juvenile Chinese sturgeon. Different lowercase letters above the column chart indicate significant differences between groups ( $P<0.05$ )

## 3 讨论

### 3.1 饲料中添加 DMPT 对中华鲟幼鱼生长性能的影响

DMPT 作为一种高效的鱼类诱食剂, 能够刺

激鱼类的嗅觉和味觉感受器, 从而提高鱼类的摄食积极性<sup>[13]</sup>。本研究结果显示, 处理组 A1、A2、A3 的增重率和特定增长率均显著高于 CK 组, 且 A3 组显著高于 A1、A2 组。这一结果表明, 在饲料中添加 DMPT 能够促进中华鲟幼鱼的生长,

且 DMPT 添加量为 1600 mg/kg 的 A3 组中, 这种促生长作用更为显著, 这与翘嘴鲌 (*Siniperca chuatsi*)<sup>[14]</sup>、哲罗鱼<sup>[4]</sup>和草鱼<sup>[5]</sup>的研究结果是一致的。本研究中 A3 组的饲料系数显著低于 CK 组, 这一结果表明在饲料中添加一定量的 DMPT 能够使中华鲟幼鱼更有效地利用饲料中的营养物质, 促进自身的生长, 这与翘嘴鲌<sup>[14]</sup>和黄颡鱼 (*Pelteobagrus fulvidraco*)<sup>[15]</sup>的研究结果是一致的。肝体指数和肥满度是反映鱼类生长和健康状况的重要指标<sup>[16]</sup>。本研究中饲料中添加 DMPT 对肝体指数和肥满度未产生显著影响, 表明 DMPT 在促进生长的同时, 不会对鱼类的身体形态和肝脏发育造成负面影响。

### 3.2 饲料中添加 DMPT 对中华鲟幼鱼免疫功能的影响

免疫球蛋白 M 作为鱼类体液免疫的关键抗体, 在体液免疫中发挥关键作用, 是评价鱼体免疫应答反应的重要指标<sup>[17]</sup>。在本研究中, 饲料中添加一定量的 DMPT 能够显著提升免疫球蛋白 M 的含量, 进而增强中华鲟幼鱼的体液免疫能力。补体系统是鱼类免疫系统的重要组成部分, 是机体抵御病原体的第一道防线, C3 和 C4 是补体系统的主要成分<sup>[18]</sup>。本研究中, 3 个处理组的补体 C3、C4 含量均显著高于 CK 组, 这表明 DMPT 能够促进中华鲟幼鱼补体系统的激活, 增强其免疫防御能力。血清中的溶菌酶、碱性磷酸酶在鱼类非特异性免疫防御中发挥重要作用, 可以在一定程度上反映鱼类非特异性免疫机能的强弱<sup>[19]</sup>。本研究结果显示, 3 个处理组的中华鲟幼鱼溶菌酶活性均显著高于 CK 组; A2 和 A3 组的碱性磷酸酶活性显著高于 CK 组, 这表明饲料中添加适量的 DMPT 可以有效提高中华鲟幼鱼的非特异性免疫能力, 增强其对病原体的抵抗能力。超氧化物歧化酶(SOD)是一种重要的抗氧化酶, 能够清除体内过多的自由基, 维持机体氧化还原平衡<sup>[20]</sup>。本研究中三个处理组的超氧化物歧化酶活性显著低于 CK 组, 推测是由于 DMPT 增强了中华鲟幼鱼的先天免疫和适应性免疫, 使得机体对自由基的产生和清除机制发生了改变。

### 3.3 饲料中添加 DMPT 对中华鲟幼鱼肠道消化酶活性的影响

有研究表明, 适宜的促摄食物质可促进鱼类肠道蛋白酶的分泌, 提高蛋白消化效率<sup>[21]</sup>。蛋白酶负责蛋白质的消化分解, 其活性变化影响蛋白质的吸收利用<sup>[22]</sup>。本研究中, 400 和 800 mg/kg DMPT 添加量更有利于促进中华鲟幼鱼肠道蛋白酶活性的提升。薛飞等<sup>[23]</sup>研究饲料中添加 DMPT 对异育银鲫 (*Carassius auratus gibelio*) 消化酶的影响时发现, 饲料中添加不同剂量的 DMPT 能够不同程度地提高异育银鲫的蛋白酶活性, 这与本研究的结果是一致的。脂肪酶作为生物体脂质水解的关键酶, 参与脂质代谢为生物提供营养和能量<sup>[24]</sup>。本研究中, A1 和 A2 组中华鲟幼鱼肠道脂肪酶活性显著高于 CK 组, 这与施氏鲟的研究结果是一致的<sup>[9]</sup>。这表明适量的 DMPT 添加量有助于鱼体对脂肪的吸收, 为生长提供更多的能量。另外, 本研究发现, A3 组的蛋白酶和脂肪酶活性与 CK 组无显著差异, 这与尼罗罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*)<sup>[25]</sup>的研究结果是一致的, 推断饲料中添加 1600 mg/kg 的 DMPT 对蛋白酶和脂肪酶活性产生一定的抑制效果, 具体机制还需进一步研究。淀粉酶在机体中的主要功能是将淀粉等碳水化合物水解为小分子糖类, 这些小分子糖类能够被肠道吸收, 进而为鱼体生长、发育、代谢等生命活动提供能量<sup>[26]</sup>。本研究发现, 三个处理组淀粉酶活性均显著高于 CK 组, 且 A1 组淀粉酶活性最高, 这表明适宜的 DMPT 添加量能有效提升中华鲟幼鱼肠道淀粉酶活性。由肠道消化酶活性的研究结果可知, 不同添加量的 DMPT 在促进消化酶活性方面呈现出不同的效果。

### 3.4 饲料中添加 DMPT 对中华鲟幼鱼肠道菌群的影响

$\alpha$  多样性反映微生物群落内物种丰富度及物种多样性。本研究中, 所有组的 Coverage 数值均接近 100%, 这表明本次测序结果能够较为全面地反映中华鲟幼鱼肠道菌群的真实情况。Chao1 和 ACE 指数衡量物种丰富度即物种数量的多少。Shannon 和 Simpson 指数用于衡量物种多样性,

受微生物群落中物种丰富度和物种均匀度的影响。PD\_whole\_tree 指数是一种基于系统发育树计算的多样性指标, 通过衡量微生物群落中物种的进化距离总和来反映其系统发育多样性<sup>[27]</sup>。本研究中, 三个处理组的 ACE 指数、Chao1 指数、Shannon 指数和 Simpson 指数与 CK 组之间无显著差异, 表明本研究的 DMPT 添加量对中华鲟幼鱼肠道菌群的丰富度和多样性无显著影响。A2 和 A3 组的 PD\_whole\_tree 指数显著高于 CK 组, 表明这两组的肠道菌群在系统发育多样性上有所增加, 推测适宜的 DMPT 添加量会对肠道菌群的进化关系产生影响。

在门分类水平上, 各组中华鲟幼鱼肠道菌群的优势菌门是一致的, 但其相对丰度存在差异。梭杆菌门作为中华鲟幼鱼肠道菌群的绝对优势菌门, 在肠道中具有重要的功能。它参与了食物的消化过程, 能够帮助分解一些复杂的营养物质, 促进宿主对营养的吸收<sup>[28]</sup>。同时, 梭杆菌门还与肠道黏膜的相互作用密切相关, 对维持肠道黏膜的完整性和免疫功能有一定的作用<sup>[29]</sup>。其相对丰度随着饲料中 DMPT 的添加量的增加呈现先降低后升高的趋势, 推测本研究采用的 DMPT 添加量 (800 mg/kg) 为梭杆菌门的生长提供了更有利的条件。本研究中, 变形菌门和厚壁菌门为肠道菌群的次级优势菌门, 这与斑马鱼 (*Danio rerio*)<sup>[30]</sup> 和鲫 (*Carassius auratus*)<sup>[28]</sup> 的研究结果是一致的。变形菌门中的一些菌种能够参与肠道内的物质代谢, 并且与肠道的免疫调节相关, 在抵御病原体入侵方面有一定的作用。厚壁菌门在能量代谢和营养吸收中扮演关键角色, 它可以帮助宿主发酵难以消化的碳水化合物, 产生短链脂肪酸等有益代谢产物, 这些产物不仅能为宿主提供能量, 还对肠道健康和免疫功能有积极影响<sup>[31]</sup>。在本研究中, 四组之间比较, 变形菌门在 A3 组的相对丰度最低, CK 组最高; 厚壁菌门在 A2 组的相对丰度最低, CK 组最高。依据研究结果推测不同的 DMPT 添加量影响了不同菌门在肠道中的生态位, 进而改变了它们的相对丰度。

在属分类水平上, 鲸杆菌属是中华鲟幼鱼肠

道菌群的绝对优势菌属, 且在 A3 组的相对丰度最高。鲸杆菌属在鱼类肠道中被认为具有促进营养物质消化吸收的功能, 能够产生多种胞外酶分解摄入的蛋白质和碳水化合物, 从而提高宿主对饲料的利用率, 推测 A3 组中华鲟幼鱼生长性能最佳可能与其肠道中鲸杆菌属相对丰度最高有关<sup>[32]</sup>。不同组的次级优势菌属存在差异, 如 CK 组和 A2 组依次为邻单胞菌属和埃希氏-志贺氏菌属; A1 组为邻单胞菌属和拟杆菌属; A3 组为拟杆菌属和邻单胞菌属。邻单胞菌属中大多都是致病菌和机会致病菌, 但也有研究表明其在健康鱼类肠道菌群中也可以参与一定的代谢活动<sup>[33]</sup>。在本实验中, 各组间比较, 邻单胞菌属在 A3 组的相对丰度最低, 这表明 1600 mg/kg 的 DMPT 添加量对其生长有一定的抑制作用。拟杆菌属在肠道中具有重要的消化功能, 它能够降解多种多糖类物质, 产生短链脂肪酸, 为宿主提供能量, 同时还参与调节肠道免疫功能<sup>[34]</sup>。拟杆菌属在 A3 组的相对丰度高于 A1 组, 这表明不同 DMPT 添加量对其生长的影响不同。埃希氏-志贺氏菌属中包含了一些与肠道疾病相关的菌种, 在 A2 组的相对丰度低于其在 CK 组, 推测适宜的 DMPT 添加量对这类潜在有害菌属的生长有一定的抑制作用<sup>[35]</sup>。

### 3.5 饲料中添加 DMPT 对中华鲟幼鱼肝脏生长相关基因表达的影响

生长激素受体 (GHR) 是生长激素 (GH)-IGF-1 轴信号通路的关键受体, GH 经血液循环到达肝脏, 与肝细胞表面 GHR 结合, 刺激细胞分泌 IGF-1, 促进细胞增殖和分化<sup>[36]</sup>。IGF-1 和 IGF-2 作为 GH 发挥生长功能的主要介导因子, 由肝脏合成并分泌, 能够促进蛋白质合成、抑制细胞凋亡, 从而推动鱼类的生长发育<sup>[37]</sup>。本实验中, A3 组在 *GHR*、*IGF-1* 和 *IGF-2* 基因表达水平的显著提升, 与该组最高的增重率和特定增长率的变化趋势是一致的, 表明 DMPT 可能通过激活 GH-IGF 轴来增强中华鲟幼鱼的生长性能。这一机制与邹青<sup>[25]</sup>在吉富罗非鱼 (*Oreochromis niloticus*) 上的研究结果相似。A1 组在生长性能上显著高于 CK 组, 但其 *GHR*、*IGF-1* 和 *IGF-2* 的表达水平并

未出现显著变化。推测在 DMPT 低添加量条件下, 生长促进作用主要依赖于增加摄食量和消化效率, 而 DMPT 高添加量则进一步通过调控基因表达促进鱼类生长。在研究促摄食物质对太门哲罗鱼 (*Hucho taimen*)<sup>[38]</sup>、施氏鲟<sup>[9]</sup>生长影响的研究中也出现了类似结果。这种调控模式的出现可能与 DMPT 对肠道菌群、消化酶活性及免疫状态的综合影响有关。

#### 4 结论

综上所述, 本研究结果表明饲料中添加适量的 DMPT 能够显著提升中华鲟幼鱼的生长性能, 提高免疫能力和消化能力。在本研究设定的 0、400、800、1600 mg/kg 四个添加梯度中, 1600 mg/kg (A3 组) 为促进中华鲟幼鱼生长与健康的最适添加量: 该添加量下, 中华鲟幼鱼的增重率、特定增长率显著高于其他所有组, 饲料系数显著低于对照组, 生长性能达到最优水平; 同时, 其血清免疫球蛋白 M、补体 C3、补体 C4 含量及溶菌酶活性等关键免疫指标均显著优于对照组及低剂量组, 肝脏中 *GHR*、*IGF-1*、*IGF-2* 等促生长相关基因表达量也显著升高, 能够通过上调促生长基因表达进而有效促进鱼体生长。此外, 饲料中添加 DMPT 虽未改变中华鲟幼鱼肠道菌群物种丰富度和多样性, 但可增加优势菌门和菌属的相对丰度, 与 1600 mg/kg 添加量的生长促进、免疫增强作用形成协同, 进一步提升鱼体肠道健康与抗病能力。

#### 参考文献:

- [1] Zheng Y P, Liu J H, Jin S, et al. Analysis on the difference of microbial composition between body surface mucus and habitat of *Acipenser sinensis* in different physiological States[J]. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(2): 150-161. [郑跃平, 刘杰豪, 金审, 等. 不同生理状态中华鲟体表黏液与生境微生物组成差异分析[J]. 渔业科学进展, 2024, 45(2): 150-161.]
- [2] Wei Q W, Li L X, Du H, et al. Research on technology for controlled propagation of cultured Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*)[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(1): 1-11. [危起伟, 李罗新, 杜浩, 等. 中华鲟全人工繁殖技术研究[J]. 中国水产科学, 2013, 20(1): 1-11.]
- [3] Fang T T, Li X, Wang J T, et al. Effects of three compound attractants in plant protein diets on growth, immunity, and intestinal morphology of Yellow River carp *Cyprinus carpio* var[J]. Aquaculture Nutrition, 2022, 2022(1): 9510968.
- [4] Wang C A, Xu Q Y, Li J N, et al. Effects of dietary dimethyl- $\beta$ -propiothetin supplementation on growth performance and protein metabolism of *Hucho taimen*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2014, 21(3): 541-548. [王常安, 徐奇友, 李晋南, 等. 二甲基- $\beta$ -丙酸噻亭对哲罗鱼生长性能和蛋白质代谢的影响[J]. 中国水产科学, 2014, 21(3): 541-548.]
- [5] Zhang B T, Zhang B, Xiao P Z, et al. Effects of dimethyl- $\beta$ -propiothetin on the growth performance, SOD activity and serum biochemical parameters in grass carp fish[J]. China Feed, 2011(20): 28-31. [张宝彤, 张波, 萧培珍, 等. DMPT 对草鱼生长性能、SOD 活性及血清生化参数的影响[J]. 中国饲料, 2011(20): 28-31.]
- [6] Wei Z L, Luo K, Shao X P, et al. Effects of rapeseed meal replacing fish meal on growth, antioxidant capacity and intestinal health of black carp(*Mylopharyngodon piceus*)[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2024, 36(6): 3876-3891. [魏正玲, 罗凯, 邵仙萍, 等. 菜籽粕替代鱼粉对青鱼生长、抗氧化能力和肠道健康的影响[J]. 动物营养学报, 2024, 36(6): 3876-3891.]
- [7] Yuan Z H, Yu L, Liu X M, et al. Effects of feed and aquatic plant feeding on intestinal microbiota composition and abundance of *Megalobrama amblycephala*[J]. Freshwater Fisheries, 2025, 55(1): 31-39. [袁子昊, 喻淋, 刘新明, 等. 饲料和水草饲喂对团头鲂肠道微生物菌群组成和丰度的影响[J]. 淡水渔业, 2025, 55(1): 31-39.]
- [8] Gao T, Sun Y, Cui Q M, et al. Effect of compound feed attractant on growth performance, digestive enzyme activity and intestinal flora composition of *Litopenaeus vannamei*[J]. Feed Research, 2021, 44(4): 43-46. [高彤, 孙悦, 崔青曼, 等. 复合诱食剂对凡纳滨对虾生长性能、消化酶活性与肠道菌群组成的影响[J]. 饲料研究, 2021, 44(4): 43-46.]
- [9] Chang Y P, Xu Q Y, Wang C A, et al. Study on the distribution of digestive enzymes of *Acipenser schrencki* and effects of several feeding attractants on enzymes' activity[J]. China Feed, 2010(6): 25-28. [畅雅萍, 徐奇友, 王常安, 等. 施氏鲟消化酶的分布及几种诱食剂对其活性的影响[J]. 中国饲料, 2010(6): 25-28.]
- [10] Chang Y P, Xu Q Y, et al. Effects of several feeding attractants on growth, body composition, serum biochemical indexes of sturgeon (*Acipenser schrencki*)[J]. Chinese Journal of Fisheries, 2009, 22(3): 23-27, 46. [畅雅萍, 徐奇友, 王常安, 等. 几种诱食剂对施氏鲟(*Acipenser schrencki*)生长性能、体成分和血液生化指标的影响[J]. 水产学杂志,

- 2009, 22(3): 23-27, 46.]
- [11] Gong X H. Studies on the synthesis and application of a new feeding attractant DMPT bromide[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2003. [宫向红. 新型水产诱食剂溴化 DMPT 的合成及应用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2003.]
- [12] Zhou D L, Liu F, Wang F B, et al. Effects of mulberry leaf extract on growth performance, serum immune indices, antioxidant ability and liver and intestinal health of *Siniperca chuatsi*[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2023, 35(2): 1147-1159. [周东来, 刘凡, 汪福保, 等. 桑叶提取物对鳊鱼生长性能、血清免疫指标、抗氧化能力及肝脏和肠道健康的影响[J]. 动物营养学报, 2023, 35(2): 1147-1159.]
- [13] Jiao Y C. Study on feeding attractant of *Litopenaeus vannamei*[D]. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2017. [焦迎春. 凡纳滨对虾诱食剂的研究[D]. 天津: 天津农学院, 2017.]
- [14] Yi Y. Effects of dietary choline chloride and DMPT on feed intake and protein utilization of Chinese perch (*Siniperca chuatsi*)[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021. [易屹. 饲料中添加氯化胆碱和 DMPT 对翘嘴鳊摄食和蛋白质利用的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.]
- [15] Chen X H, Shi Q C, Zhou L H. Effects of different attractants on feeding and growth performance of *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. Feed China, 2014(16): 34-37. [陈学豪, 史庆超, 周立红. 饲料中添加不同诱食剂对黄颡鱼摄食和生长性能的影响[J]. 饲料广角, 2014(16): 34-37.]
- [16] Li J. Effects of dietary soybean protein peptide levels on production performance, digestion and immune function of *Oncorhynchus mykiss*[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2017. [李杰. 日粮中大豆蛋白小肽添加水平对虹鳟生产性能、消化及免疫功能的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2017.]
- [17] Shan N, Lin T T, Lai Q F, et al. Effects of four environmental stresses on biochemical indexes in the plasma of gibel carp *Carassius auratus gibelio*[J]. Marine Fisheries, 2017, 39(2): 162-172. [单娜, 林听听, 来琦芳, 等. 4 种环境源性胁迫对异育银鲫血浆生化指标的影响[J]. 海洋渔业, 2017, 39(2): 162-172.]
- [18] Xiong Y M, Zeng Q H, Liang P, et al. Effect of seaweed enzyme hydrolysis on growth, digestion and absorption, and immune indexes of *Pseudourostyla cristata*[J]. Feed Research, 2025, 48(3): 56-60. [熊宇明, 曾企辉, 梁萍, 等. 海藻酶解产物对大黄鱼生长、消化吸收及免疫指标的影响[J]. 饲料研究, 2025, 48(3): 56-60.]
- [19] Li Q Y, Deng Q H, Chen G R, et al. Effects of compound immunopotentiator on growth performance, serum biochemical indices and non-specific immunity of juvenile hybrid sturgeon[J]. Feed Industry, 2025, 46(5): 79-83. [李秋云, 邓勤华, 陈光荣, 等. 复合免疫增强剂对杂交鲟幼鱼生长性能、血清生化指标和非特异性免疫功能的影响[J]. 饲料工业, 2025, 46(5): 79-83.]
- [20] Jiménez A G, Nash-Braun E, Meyers J R. Chronic thermal acclimation effects on critical thermal maxima ( $CT_{max}$ ) and oxidative stress differences in white epaxial muscle between surface and cave morphotypes of the Mexican cavefish (*Astyanax mexicanus*)[J]. Physiological and Biochemical Zoology, 2023, 96(5): 369-377.
- [21] Morimoto Kofuji P Y, Hosokawa H, Masumoto T. Effects of dietary supplementation with feeding stimulants on yellowtail *Seriola quinqueradiata* (Temminck & Schlegel; Carangidae) protein digestion at low water temperatures[J]. Aquaculture Research, 2006, 37(4): 366-373.
- [22] Li P, Gatlin D M. Nucleotide nutrition in fish: Current knowledge and future applications[J]. Aquaculture, 2006, 251(2-4): 141-152.
- [23] Xue F, Chen W, Zhou W R, et al. Changes of digestive enzyme activities in the intestine of *Carassius auratus gibelio* carp fed with dimethyl 1- $\beta$ -propiothetin (DMPT) added diet[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2007, 23(2): 114-118. [薛飞, 陈魏, 周维仁, 等. 饲料中添加二甲基- $\beta$ -丙酸噻亭(DMPT)后异育银鲫肠消化酶的活性变化[J]. 江苏农业学报, 2007, 23(2): 114-118.]
- [24] Wang Y Z, Liu S, Liang W K, et al. Identification and expression profiling of lipase genes in *arma custos*[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2025, 41(1): 32-43. [王禹智, 刘莎, 梁文凯, 等. 蠮螋脂肪酶基因的鉴定与表达特征分析[J]. 中国生物防治学报, 2025, 41(1): 32-43.]
- [25] Zou Q. The study of effects and mechanisms of seven feeding stimulants on feed intake, growth performance in GIFT tilapia (*Oreochromis niloticus*)[D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2016. [邹青. 促摄食物质对吉富罗非鱼摄食、生长的影响及机制研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2016.]
- [26] Zhou S S. Effects of mulberry leaf extract on growth, immunity and hepatointestinal function of *Lateolabrax maculatus*[D]. Xiamen: Jimei University, 2024. [周思顺. 桑叶提取物对花鲈生长、免疫及肝肠功能的影响[D]. 厦门: 集美大学, 2024.]
- [27] Kuczynski J, Stombaugh J, Walters W A, et al. Using QIIME to analyze 16S rRNA gene sequences from microbial communities[J]. Current Protocols in Microbiology, 2012, 27(1): 1E.5.1-1E.5.20.
- [28] Huang G X. The study of intestinal bacterial molecular ecology of cultured fishes[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2025. [黄国鑫. 养殖鱼类肠道细菌分子生态学研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2025.]

- tural University, 2008. [黄光祥. 养殖鱼肠道菌群分子生态的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2008.]
- [29] Li M, Liang H, Yang H W, et al. Deciphering the gut microbiome of grass carp through multi-omics approach[J]. *Microbiome*, 2024, 12(1): 2.
- [30] Spilsbury F, Foysal M J, Tay A, et al. Gut microbiome as a potential biomarker in fish: Dietary exposure to petroleum hydrocarbons and metals, metabolic functions and cytokine expression in juvenile *Lates calcarifer*[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2022, 13: 827371.
- [31] Li Y, Guo B Z, Wu Z K, et al. Effects of fermented soybean meal supplementation on the growth performance and cecal microbiota community of broiler chickens[J]. *Animals*, 2020, 10(6): 1098.
- [32] Trapnell C, Williams B A, Pertea G, et al. Transcript assembly and quantification by RNA-Seq reveals unannotated transcripts and isoform switching during cell differentiation[J]. *Nature Biotechnology*, 2010, 28(5): 511-515.
- [33] Sun L F. Effect of feeding habits domestication on intestinal microflora, gut structure and function of mandarin fish (*Siniperca chuatsi*)[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016. [孙龙芳. 人工饲料驯化对鳊鱼肠道微生物和肠道结构功能的影响研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2016.]
- [34] Lopetuso L R, Scaldaferri F, Petito V, et al. Commensal Clostridia: Leading players in the maintenance of gut homeostasis[J]. *Gut Pathogens*, 2013, 5(1): 23.
- [35] Senderovich Y, Izhaki I, Halpern M. Fish as reservoirs and vectors of *Vibrio cholerae*[J]. *PLoS One*, 2010, 5(1): e8607.
- [36] Zhang X T, Wu Y X, Zhang Y, et al. Molecular characteristics, expression patterns, and response of insulin-like growth factors gene induced by sex steroid hormones in blotched snakehead (*Channa maculata*)[J]. *Fishes*, 2024, 9(4): 120.
- [37] Guan B, Wen H S, Liu Q, et al. Effects of acute temperature stress on metabolic enzyme activity and gene expression related to growth in rainbow trout *Oncorhynchus mykiss*[J]. *Journal of Dalian Ocean University*, 2014, 29(6): 566-571. [管标, 温海深, 刘群, 等. 急性温度胁迫对虹鳟肝脏代谢酶活性及生长相关基因表达的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2014, 29(6): 566-571.]
- [38] Wang C A, Xu Q Y, Chang Y P, et al. Effects of feeding attractants on growth and body composition, digestive enzyme and serum indices of *Hucho taimen*[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2011, 38(1): 65-71. [王常安, 徐奇友, 畅雅萍, 等. 不同促摄物质对哲罗鲑生长、体成分、消化酶和血液生化指标的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2011, 38(1): 65-71.]

## Effects of dietary DMPT supplementation on growth performance, immune function, and digestive capacity in juvenile Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*)

CHENG Chao, ZHANG Jianming, SHU Tingting, QU Huantao, ZHANG Dezhi, JIANG Wei\*, YANG Jing\*

Hubei Key Laboratory of Three Gorges Project for Fish Resource Conservation (Chinese Sturgeon Research Institute of China Three Gorges Corporation), Yichang, Hubei 443100, China

**Abstract:** The Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*), a flagship species of the Yangtze River and national first-class key wild protected animal, currently relies on stock enhancement and release as the most effective and direct means of population conservation. However, juveniles from full artificial propagation exhibit weaker physical conditions than those from wild populations, including slow growth, low feeding efficiency, and poor stress resistance. To investigate the effects of dimethyl- $\beta$ -propiothetin (DMPT) supplementation on growth, serum immunity, intestinal digestive enzyme activities, and gut microbiota composition of Chinese sturgeon juveniles, a 5-week feeding trial was conducted with sub-adult second-generation juveniles (initial body weight:  $300.88 \pm 17.64$  g). DMPT was added to the basal diet at 0, 400, 800, and 1600 mg/kg (CK, A1, A2, and A3 groups, respectively), with 3 replicates per group and 10 fish per replicate. The results showed that weight gain and specific growth rate (SGR) in groups A1, A2, and A3 were significantly higher than those in the CK group. The

feed conversion ratio in group A3 was significantly lower than that in the CK group. The contents of serum immunoglobulin M (IgM), complement C3, complement C4, and lysozyme activity increased progressively with increasing DMPT levels, with values significantly higher in groups A2 and A3 than those in the CK group. Serum superoxide dismutase activity was significantly lower in all treatment groups than that in the CK group, while alkaline phosphatase activity was significantly higher in groups A2 and A3. Digestive enzyme activities exhibited a trend of initially increasing and subsequently decreasing with increasing DMPT levels. Protease and lipase activities in groups A1 and A2 were significantly higher than those in the CK group, while amylase activity in all treatment groups was significantly higher than that in the CK group. No significant differences were observed in ACE, Chao1, Shannon, or Simpson indices among the treatment and control groups; however, the phylogenetic diversity whole tree (PD\_whole\_tree) index in groups A2 and A3 was significantly higher than that in the CK group. At the phylum level, Fusobacteria was the absolute dominant gut phylum across all groups, followed by Proteobacteria and Firmicutes; Fusobacteria relative abundance initially decreased and subsequently increased with increasing DMPT levels. At the genus level, *Cetobacterium* was the absolute dominant genus, with relative abundance progressively increasing with higher DMPT supplementation. The secondary dominant genera in groups CK and A2 were *Plesiomonas* and *Escherichia-Shigella*, while those in A1 and A3 groups were *Plesiomonas* and *Bacteroides*. Liver gene expression of growth hormone receptor (GHR) in groups A2 and A3 and insulin-like growth factor-1 (IGF-1) and IGF-2 in group A3 were significantly higher than that in the CK group, with *GHR*, *IGF-1*, and *IGF-2* expression increasing progressively with DMPT dosage. In conclusion, appropriate DMPT supplementation significantly improved growth performance, immune capacity, and digestive capacity in juvenile Chinese sturgeon. Among the four addition gradients (0, 400, 800, and 1600 mg/kg) established in this study, 1600 mg/kg was optimal for promoting growth and health. This dosage can effectively enhance liver growth-related gene expression, thereby promoting the growth of the fish; simultaneously, its key immune indicators were significantly superior to those of the control and low-dose groups. Although DMPT supplementation did not affect species richness or diversity of intestinal flora, it increased the relative abundance of dominant phyla and genera, thereby contributing to improved growth, intestinal health, and disease resistance.

**Key words:** DMPT; *Acipenser sinensis*; growth; immunity; digestive enzyme; intestine microbiota; gene expression

**\*Corresponding author:** JIANG Wei, E-mail: Jiang\_wei6@ctg.com.cn; YANG Jing, E-mail: yang\_jing7@ctg.com.cn