

DOI: 10.12264/JFSC2023-0199

维生素 E 对彭泽鲫亲本生长、繁殖及免疫力的影响

肖俊^{1,2}, 龙凡^{1,2}, 丁立云^{1,2}, 赵俊³, 姚远^{1,2}, 巫伟华^{1,2}, 傅义龙^{1,2}, 陈文静^{1,2}

1. 江西省水产科学研究所, 江西 南昌 330039;
2. 农业农村部湖泊渔业资源环境科学观测实验站, 江西 南昌 330039;
3. 华南师范大学生命科学学院, 广东 广州 510631

摘要: 为探究饲料维生素 E 含量对彭泽鲫(*Carassius auratus* var. *Pengze*)亲本生长、卵巢发育和营养成分、抗氧化指标及组织维生素 E 含量的影响, 选取初始体重为(256.30±4.70) g 的彭泽鲫亲本进行养殖试验, 投喂含有 0 mg/kg (实测值为 68.1 mg/kg)、400 mg/kg (实测值为 462.3 mg/kg)和 1600 mg/kg (实测值为 1655.8 mg/kg)维生素 E 的等氮等能饲料, 养殖周期 60 d。结果显示: 饲料中维生素 E 含量对彭泽鲫亲本的生长、存活率和增重率无显著影响($P>0.05$), 400 mg/kg 组肥满度显著高于 0 mg/kg 组($P<0.05$); 400 mg/kg 组性腺指数显著高于其余两组($P<0.05$)。1600 mg/kg 组肝脏中维生素 E 含量显著高于其余两组($P<0.05$), 400 mg/kg 和 1600 mg/kg 组卵巢中维生素 E 含量显著高于 0 mg/kg 组($P<0.05$); 卵巢必需氨基酸总量显著增加($P<0.05$), 400 mg/kg 组的缬氨酸、异亮氨酸、苏氨酸及赖氨酸显著高于 0 mg/kg 组($P<0.05$), 1600 mg/kg 组的组氨酸、谷氨酸和总氨基酸含量显著高于其余两组($P<0.05$); 脂肪酸含量 1600 mg/kg 组 C18:3n6 和 Σ PUFA 显著低于其余两组($P<0.05$), C22:6n3 (DHA)和 Σ n-3PUFA 在 400 mg/kg 组达峰值, 显著高于 0 mg/kg 组($P<0.05$)。血清中, 400 mg/kg 组和 1600 mg/kg 组 CAT、ACP 和 VTG 显著高于 0 mg/kg 组($P<0.05$), 添加维生素 E 的两组与 0 mg/kg 组相比 MDA 显著降低($P<0.05$), T-AOC 和 LZM 在 400 mg/kg 组达峰值, 显著高于 0 mg/kg 组($P<0.05$)。肝脏中, SOD 活性在 400 mg/kg 组达峰值, 显著高于 0 mg/kg 组($P<0.05$), 且随着饲料维生素 E 含量增加, MDA 活性显著降低($P<0.05$)。综上所述, 在本研究中, 饲料中 400 mg/kg 的维生素 E 的添加量可显著提高彭泽鲫亲本的性腺指数和卵巢中维生素 E 含量, 有利于氨基酸和脂肪酸的沉积并增加血清和肝脏中免疫和抗氧化酶活力, 从而改善彭泽鲫亲本性腺发育。

关键词: 维生素 E; 彭泽鲫亲本; 性腺指数; 抗氧化酶

中图分类号: S963

文献标志码: A

文章编号: 1005–8737–(2024)11–1387–12

彭泽鲫(*Carassius auratus* var. *Pengze*)是国内首个利用野生鲫进行人工选育的新品种。近年来, 科研人员对我国鲫资源、遗传多样性及不同鲫的起源进化进行了大量研究, 发现彭泽鲫具有丰富的遗传变异和育种潜力。通过其培育出的白金丰产鲫(*Carassius auratus* var. *Pengze* ♀×*Cyprinus acutidorsalis* Wang ♂)^[1](品种登记号: GS-01-001-2015)和穗丰鲫(*Carassius auratus* var. *Pengze* ♀×*Cyprinus acutidorsalis* Wang ♂)^[2](品种登记号: GS-01-002-2023)等品种, 在全国范围内大规模推

广后, 不仅取得了巨大的经济效益, 也带来了重要的社会效益。

随着我国水产养殖业的迅速发展, 优质苗种供不应求的问题日益显现, 如何提高苗种质量已经成为水产养殖业面临的主要挑战。营养在鱼类的生长和繁殖中扮演着关键角色, 满足亲本的营养需求是提高繁殖性能的关键因素^[3]。维生素 E 作为一种重要的脂溶性生物组织抗氧化剂, 在鱼类生长、免疫、抗氧化和繁殖中起重要作用^[4]。根据 2011 年美国国家委员会(National Research

收稿日期: 2024-06-13; 修订日期: 2024-07-04.

基金项目: 国家现代农业产业体系项目(CARS-46); 江西省重点研发计划项目(20203BBF63045); 江西省现代农业产业技术体系项目(JXARS-03); 江西省高层次高技能领军人才培养工程项目.

作者简介: 肖俊(1991–), 男, 硕士, 水产师, 研究方向为水产动物营养. E-mail: 874370756@qq.com

通信作者: 丁立云, 博士, 研究员, 研究方向为水产动物营养与饲料科学. E-mail: dingliyun2008@163.com

Council, NRC)公布的数据, 常见淡水鱼生长所需维生素 E 含量主要集中在 25~100 mg/kg^[5]。由于鱼类无法自行合成维生素 E, 因此必须通过饮食获取足够的维生素 E 来维持其正常生理功能^[6]。维生素 E 在水生生物应用方面的研究报道已有很多, 如通过对细鳞鲱(*Brachymystax lenok*)^[7]幼鱼和胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus*)^[8]幼鱼的研究发现, 饲料中添加适量维生素 E 可以显著提高其生长指数。在半滑舌鲷(*Cynoglossus semilaevis*)^[9]亲鱼的研究中发现, 饲料中添加 1200 mg/kg 的维生素 E 可以显著促进亲鱼性腺的发育。在黄鳝的研究中发现, 饲料中维生素 E 添加量达到 200 mg/kg 时, 雌鳝的繁殖性能明显改善, 但低于 50 mg/kg 时会抑制其卵巢发育, 高于 200 mg/kg 时对卵巢发育没有显著影响^[10]。因此, 维生素 E 在水生动物性腺发育过程中扮演重要角色, 可以促进水生动物性腺激素的产生^[11-12], 缺乏或过量添加维生素 E 都可能对长期的水生动物造成抑制, 甚至损害, 同时也会影响繁殖期亲体卵子的质量^[13]。

目前, 关于维生素 E 对鱼类亲本性腺发育的影响仅在星斑川鲈(*Platichthys stellatus*)亲本^[14]、圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)亲本^[15]、尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)^[16]和半滑舌鲷(*Cynoglossus semilaevis*)^[9]亲本等中有少量研究, 关于彭泽鲫亲本的研究国内外未见报道。本研究以彭泽鲫亲本为研究对象, 探究在基础饲料中添加维生素 E, 对彭泽鲫亲本生长、性腺发育与免疫力的影响, 以期为后续研究彭泽鲫亲本营养需求提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 实验鱼及饲养管理

彭泽鲫亲本购买于九江良盛生态农业发展有限公司, 正式实验开始前在循环水系统中用基础饲料暂养 4 周, 以适应养殖环境和饲料规格。随机选取体重一致且健康有活力的彭泽鲫亲本 135 尾, 平均初始体重为(256.30±4.70) g, 随机分为 3 组, 每组设 3 个平行, 每个平行 15 尾鱼, 每个圆形养殖桶(规格为直径 800 mm×高 650 mm)对应 1 个平行, 养殖周期 60 d。实验鱼每日 9:00 和

17:00 饱食投喂实验日粮 2 次。整个实验期间水质监测情况为: 水温(20±2) ℃, 溶解氧浓度不低于 7 mg/L, pH 7.53±0.12, 氨氮和亚硝酸浓度不高于 0.1 mg/L。光周期为自然周期。

1.2 实验饲料

本研究饲料以鱼粉和豆粕为主要蛋白源, 鱼油为脂肪源, 按照表 1 的配方配制基础饲料, 在基础饲料中配制维生素 E 的添加量分别 0, 400

表 1 实验饲料组成及营养水平(风干基础)
Tab. 1 Composition and nutrient levels of experimental diets (DM basis)

项目 items	维生素 E 含量/(mg/kg) vitamin E content		
	%		
	0	400	1600
豆粕 soybean meal	45	45	45
进口鱼粉 imported fish meal	15	15	15
谷朊粉 gluten	5	5	5
玉米淀粉 corn starch	25	25	25
鱼油 fish oil	5	5	5
磷酸二氢钙 calcium dihydrogen phosphate	1	1	1
多维 ¹ vitamin premix	1	1	1
多矿 ² mineral premix	2	2	2
氯化胆碱 choline chloride	0.5	0.5	0.5
微晶纤维素 microcrystalline cellulose	0.5	0.5	0.5
营养水平 nutritional level			
干物质 dry matter	91.89	91.82	91.27
粗蛋白质 crude protein	35.73	35.52	36.01
粗脂肪 crude lipid	7.92	7.87	7.54
粗灰分 crude ash	6.93	6.92	7.27
实测维生素 E 含量/(mg/kg) actual measurement of vitamin E content	68.1	462.3	1655.8

注: ¹ 多维(mg/kg 日粮): 硫胺素 15, 核黄素 25, 吡哆醇 15, 维生素 B₁₂ 0.2, 叶酸 5, 碳酸钙 50, 肌醇 500, 烟酸 100, 生物素 2, 抗坏血酸 100, 维生素 A 100, 维生素 D 20, 维生素 E 55, 维生素 K 5。

² 多矿(mg/kg 日粮): MgSO₄·7H₂O 450, FeSO₄·7H₂O 950, CuSO₄·5H₂O 10, ZnSO₄·7H₂O 108, MnSO₄·4H₂O 40, KI 1.5, NaCl 600, NaH₂PO₄·2H₂O 850, KH₂PO₄ 1350, CoSO₄·4H₂O 0.50。

营养水平为实测值。

Note: ¹Multivitamin (mg/kg, daily ration): thiamine 15, riboflavin 25, pyridoxine 15, vitamin B₁₂ 0.2, folic acid 5, CaCO₃ 50, inositol 500, nicotinic acid 100, biotin 2, ascorbic acid 100, vitamin A 100, vitamin D 20, vitamin E 55, vitamin K 5。

²Multimineral (mg/kg, daily ration): MgSO₄·7H₂O 450, FeSO₄·7H₂O 950, CuSO₄·5H₂O 10, ZnSO₄·7H₂O 108, MnSO₄·4H₂O 40, KI 1.5, NaCl 600, NaH₂PO₄·2H₂O 850, KH₂PO₄ 1350, CoSO₄·4H₂O 0.50。Nutritional level is measured value。

和 1600 mg/kg。实验用的维生素 E 为 DL- α -生育酚乙酸酯(粉)购自吉林北沙制药有限公司, 纯度为 50%。采用中华人民共和国国家标准 GB/T 17812—2008 的高效液相色谱法测得 3 组饲料中维生素 E 实际含量分别为 68.1, 462.3 和 1655.8 mg/kg。所有原料粉碎后过 80 目筛, 按配方比例称量后, 加油和水混合制成直径为 2 mm 的颗粒饲料, 晾干后用封口袋封装, 置于冰箱 -20 °C 保存备用。

1.3 样品采集

饲养实验结束后, 饥饿 24 h 后对每个桶的鱼进行称重, 并统计总数。按照传统的腹部检查法(轻压腹部看是否能挤出精液, 雌鱼腹部柔软)初步判断雌雄, 并从每个养殖桶中随机取 6 尾雌鱼, 经 MS-222 (120 mg/L)麻醉后, 测量体长和体重, 以计算肥满度(condition factor, CF)。用 1 mL 无菌注射器进行尾静脉采血, 血液置于肝素钠抗凝管中, 4 °C 静止 12 h 后, 4000 r/min 离心 10 min, 取其上清液。静脉采血后, 将样本中的雌鱼置于冰盘内解剖, 完整取出性腺(即卵巢)和肝脏, 记录性腺重。取 1 g 左右卵巢组织置于 4% 甲醛中固定 12 h, 用于卵径和怀卵量的测定, 卵母细胞的直径在显微镜下用目微尺测量, 每尾雌鱼测量 20 个卵母细胞。血液上清液、性腺和肝脏组织样品放于冰箱 -70 °C 保存。

1.4 样品测定

水分、粗脂肪和粗蛋白分别采用恒温干燥法(GB/T 5009.3—2003)、索氏抽提法(GB/T 5009.6—2003)和凯氏定氮法(GB/T 5009.3—2003)测定, 粗灰分含量测定采用 550 °C 马弗炉灼烧法(GB/T 5009.4—2003)。饲料和卵巢脂肪酸含量测定参照 GB/T 17377—2008 的方法, 采用气相色谱法(SHIMADZU, GC-2010, Japan)检测脂肪酸的成分。通过量化特定峰面积占总峰面积的百分比来计算脂肪酸(总脂肪酸%)。超氧化物歧化酶(SOD)活力采用黄嘌呤氧化酶法; 丙二醛(MDA)采用硫代巴比妥酸缩合比色法; 总抗氧化活性(T-AOC)、过氧化氢酶活性(CAT)、溶菌酶(LZM)、碱性磷酸酶(ALP)、酸性磷酸酶(ACP)、雌二醇 2 (E2)、孕

酮(PROG)、卵黄蛋白原(VTG)、肝脏和卵巢维生素 E 含量均采用南京建成生物工程研究所试剂盒检测, 按说明书要求操作并计算。

1.5 数据处理

对养殖试验结束后的彭泽鲫雌鱼群体数据进行处理, 对存活率、增重率和肥满度的变化进行比较, 观察性腺指数的变化, 绝对怀卵量的测定通过以下步骤进行: 称量卵巢总重-取样-称量样品重量-计算样品中卵粒数量-通过公式计算绝对怀卵量。涉及的公式主要有:

$$\text{存活率(survival rate, SR, \%)}=100\times N_2/N_1;$$

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

$$\text{肥满度(condition factor, CF, g/cm}^3\text{)}=100\times W/L^3;$$

$$\text{性腺指数(gonad somatic index, GSI, \%)}=100\times W_G/W_t;$$

$$\text{绝对怀卵量(absolute fecundity, F, 粒)}=O_G\times W_G;$$

$$\text{相对怀卵量(relative fecundity, RF, 粒/g)}=F/W_t。$$

式中, N_1 为试验鱼初始尾数, N_2 为试验鱼终末尾数, W_t 为鱼终末体重(g), W_0 为鱼初始体重(g); W 为取样鱼体重(g), L 为取样鱼体长(cm), W_G 为鱼性腺重(g), O_G 为单位质量卵巢内的卵粒数(eggs/g), F 为绝对怀卵量(粒)。

实验所得数据用 Microsoft Excel 2021 进行整理, 用 SPSS 17.0 统计软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA), 当差异达到显著($P<0.05$)时, 采用 Turkey 法进行组间的多重比较。实验结果以平均值 $\pm$ 标准差($\bar{x}\pm SD$)表示。

2 结果与分析

2.1 饲料维生素 E 含量对彭泽鲫亲本生长的影响

饲料维生素 E 水平对彭泽鲫亲本生长的影响如表 2。不同含量维生素 E 喂养对彭泽鲫亲本的终末体重和增重率无显著影响($P>0.05$)。不同实验组彭泽鲫亲本的肥满度存在显著差异, 即 400 mg/kg 组肥满度显著高于 0 mg/kg 组($P<0.05$), 但与 1600 mg/kg 组无显著差异($P>0.05$)。

表 2 饲料中添加不同含量维生素 E 的 3 个实验组中彭泽鲫亲本生长参数

Tab. 2 The growth parameters of *Carassius auratus* var. Pengze broodstock cultured at three groups with different contents of dietary vitamin E

生长参数 growth parameter	维生素 E 含量/(mg/kg) vitamin E content		
	0	400	1600
初始体重/ (g/尾) IBW	253.78±5.34	257.07±3.77	260.08±1.30
终末体重/ (g/尾) FBW	344.12±21.67	347.97±23.86	344.83±56.72
存活率/% SR	100±0.00	100±0.00	100±0.00
增重率/% WGR	35.58±7.65	35.42±10.02	32.66±22.54
肥满度/(g/cm ³) CF	3.11±0.04 ^b	3.28±0.10 ^a	3.16±0.04 ^{ab}

注: 同行数据肩标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), 相同或无字母表示差异不显著($P>0.05$).

Note: Means with different letters in the same column are significantly different ($P<0.05$), and means with the same or no letter in the same column are not significantly different ($P>0.05$).

2.2 饲料维生素 E 含量对彭泽鲫母本繁殖生物学参数的影响

维生素 E 对彭泽鲫亲本性腺指数、卵径和怀卵量影响见表 3。400 mg/kg 组性腺指数显著高于其余两组($P<0.05$)。卵径在 400 mg/kg 组达到峰值为(674.58±19.08) μm , 但与其他两组无显著差异($P>0.05$)。相对怀卵量和绝对怀卵量也是在 400 mg/kg 组达到最高, 在 1600 mg/kg 组略有下降, 但各组之间无显著差异($P>0.05$)。

表 3 饲料中添加不同含量维生素 E 的 3 个实验组中彭泽鲫雌性亲本的繁殖生物学参数

Tab. 3 Reproductive parameters of *Carassius auratus* var. Pengze broodstock cultured at three groups with different contents of dietary vitamin E

繁殖生物学参数 reproductive parameter	维生素 E 含量/(mg/kg) vitamin E content		
	0	400	1600
性腺指数/% GIS	8.15±0.25 ^b	11.05±0.51 ^a	8.32±0.93 ^b
卵径/ μm egg diameter, D	646.48±44.40	674.58±19.08	642.40±15.76
绝对怀卵量/ 10 ⁴ eggs F	3.30±0.32	5.53±1.86	5.13±0.70
相对怀卵量/ (eggs/g) RF	97.02±10.53	163.06±67.98	149.31±5.37

注: 同行数据肩标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), 相同或无字母表示差异不显著($P>0.05$).

Note: Means with different letters in the same column are significantly different ($P<0.05$), and means with the same or no letter in the same column are not significantly different ($P>0.05$).

2.3 饲料维生素 E 含量对彭泽鲫亲本血清和肝脏中激素指标及卵巢组织维生素 E 含量的影响

由表 4 可知, 饲料维生素 E 含量对彭泽鲫亲本血清和肝脏中的 E2 和 PROG 均无显著影响($P>0.05$)。血清中, 1600 mg/kg 组 VTG 显著高于 0 mg/kg 组($P<0.05$), 但肝脏中 VTG 无显著差异($P>0.05$)。肝脏组织中, 1600 mg/kg 组维生素 E 含量显著高于 0 mg/kg 组和 400 mg/kg 组($P<0.05$), 卵巢组织中 400 mg/kg 和 1600 mg/kg 组维生素 E 含量显著高于 0 mg/kg 组($P<0.05$)。

表 4 饲料中添加不同含量维生素 E 的 3 个实验组中彭泽鲫亲本血清和肝脏中激素指标及卵巢组织维生素 E 含量

Tab. 4 Hormone indexes in the serum and liver and vitamin E content in the ovary tissue of *Carassius auratus* var. Pengze broodstock cultured at three groups with different contents of dietary vitamin E

组织 tissue	指标 indicator	维生素 E 含量/(mg/kg) vitamin E content		
		0	400	1600
血清 serum	雌二醇 2/(ng/L) E2	94.05±5.86	84.98±7.37	82.80±12.61
	孕酮/(ng/mL) PROG	4.51±0.72	4.41±0.20	3.84±0.68
	卵黄蛋白原/ ($\mu\text{g/mL}$) VTG	2.97±0.08 ^b	3.05±0.09 ^{ab}	4.28±0.67 ^a
肝脏 liver	雌二醇 2/(ng/L) E2	23.39±6.66	21.15±2.42	20.28±1.93
	孕酮/(ng/mL) PROG	1.55±0.35	1.45±0.14	1.36±0.13
	卵黄蛋白原/ ($\mu\text{g/mL}$) VTG	0.60±0.14	0.64±0.06	0.61±0.04
	维生素 E 含量/ ($\mu\text{g/mg prot}$) vitamin E content	0.24±0.03 ^b	0.30±0.41 ^b	0.99±0.07 ^a
卵巢 ovary	维生素 E 含量/ ($\mu\text{g/mg prot}$) vitamin E content	0.64±0.20 ^b	1.07±0.10 ^a	1.00±0.10 ^a

注: 同行数据肩标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), 相同或无字母表示差异不显著($P>0.05$).

Note: Means with different letters in the same column are significantly different ($P<0.05$), and means with the same or no letter in the same column are not significantly different ($P>0.05$).

2.4 饲料维生素 E 含量对彭泽鲫亲本卵巢组织氨基酸含量的影响

由表 5 可知, 饲料中添加维生素 E 的实验组彭泽鲫亲本卵巢组织中必需氨基酸的总量显著增加, 400 mg/kg 组显著高于 0 mg/kg 组($P<0.05$), 其中缬氨酸(Val)、异亮氨酸(Ile)、苏氨酸(Thr)、赖氨酸(Lys)和总必需氨基酸均显著增加, 但与 1600 mg/kg 组无显著差异($P>0.05$)。1600 mg/kg

组的组氨酸(His)、谷氨酸(Glu)和总氨基酸含量显著高于其余两组($P<0.05$), 各组之间非必需氨基酸总量无显著差异($P>0.05$)。

表 5 饲料中添加不同含量维生素 E 的 3 个实验组中彭泽鲫亲本的卵巢氨基酸组成(湿重)

Tab. 5 Amino acid composition in the ovary of *Carassius auratus* var. *Pengze* broodstock cultured at three groups with different contents of dietary vitamin E (wet weight)

氨基酸 amino acid	维生素 E 含量/(mg/kg) vitamin E content			%
	0	400	1600	
精氨酸 Arg	1.02±0.07	1.10±0.05	1.08±0.07	
组氨酸 His	0.69±0.02 ^b	0.74±0.06 ^{ab}	0.82±0.03 ^a	
缬氨酸 Val	0.82±0.05 ^b	1.05±0.07 ^a	1.02±0.06 ^a	
苯丙氨酸 Phe	0.76±0.04	0.77±0.05	0.81±0.05	
亮氨酸 Leu	1.61±0.09	1.76±0.13	1.67±0.11	
异亮氨酸 Ile	0.59±0.04 ^b	0.83±0.08 ^a	0.79±0.06 ^a	
苏氨酸 Thr	0.86±0.03 ^b	0.99±0.03 ^a	1.03±0.04 ^a	
蛋氨酸 Met	0.31±0.06	0.28±0.01	0.28±0.06	
赖氨酸 Lys	1.23±0.05 ^b	1.39±0.01 ^a	1.38±0.04 ^a	
色氨酸 Trp	0.18±0.02	0.18±0.01	0.20±0.01	
ΣEAA ¹	8.08±0.41 ^b	9.10±0.30 ^a	9.08±0.43 ^a	
天冬氨酸 Asp	1.60±0.06	1.51±0.01	1.55±0.12	
丝氨酸 Ser	1.41±0.07	1.54±0.04	1.58±0.12	
谷氨酸 Glu	3.42±0.18 ^b	3.87±0.22 ^{ab}	4.22±0.21 ^a	
丙氨酸 Ala	1.74±0.08	1.78±0.03	1.76±0.14	
甘氨酸 Gly	1.56±0.05	1.97±0.34	2.20±0.33	
酪氨酸 Tyr	0.79±0.04	0.81±0.03	0.83±0.06	
脯氨酸 Pro	0.98±0.08	1.06±0.05	1.03±0.07	
ΣNEAA ²	11.51±0.54	12.54±0.54	13.17±0.99	
ΣAA ³	19.58±0.95 ^b	21.6±0.22 ^{ab}	22.19±1.43 ^a	

注: ¹ΣEAA: 总必需氨基酸; ²ΣNEAA: 总非必需氨基酸; ³ΣAA: 总氨基酸。同行数据肩标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), 相同或无字母表示差异不显著($P>0.05$)。
Note: ¹ΣEAA: total essential amino acids; ²ΣNEAA: total non-essential amino acids; ³ΣAA: total amino acids. Means with different letters in the same column are significantly different ($P<0.05$), and means with the same or no letter in the same column are not significantly different ($P>0.05$).

2.5 饲料维生素 E 含量对彭泽鲫亲本卵巢组织脂肪酸组成的影响

由表 6 可知, 饲喂不同维生素 E 含量的彭泽鲫亲本卵巢脂肪酸组成种类基本一致, 共检测出 7 种饱和脂肪酸(SFA)、4 种单不饱和脂肪酸(MUFA)和 8 种多不饱和脂肪酸(PUFA), 饱和脂肪酸(SFA)如 C14 : 0、C15 : 0 和 C17 : 0 的含量各组间差异不显著($P>0.05$), 但不饱和脂肪酸的含量差异较大。随着饲料中维生素 E 水平的提高, 彭泽鲫

亲本卵巢组织中 1600 mg/kg 组 C18 : 3n6 和 ΣPUFA 显著低于其余两组($P<0.05$), 而 C22 : 6n3 (DHA)和 Σn-3PUFA 在 400 mg/kg 组达到峰值, 并显著高于 0 mg/kg 组($P<0.05$), 但与 1600 mg/kg 组无显著差异($P>0.05$)。

表 6 饲料中添加不同含量维生素 E 的 3 个实验组中彭泽鲫亲本卵巢脂肪酸组成

Tab. 6 Fatty acid composition of ovary in *Carassius auratus* var. *Pengze* broodstock cultured at three groups with different contents of dietary vitamin E

脂肪酸 fatty acid	维生素 E 含量/(mg/kg) vitamin E content			%
	0	400	1600	
C14 : 0	1.04±0.00	1.03±0.08	1.12±0.15	
C15 : 0	0.17±0.03	0.17±0.02	0.18±0.01	
C16 : 0	16.36±0.84 ^b	16.78±0.67 ^b	18.58±0.61 ^a	
C17 : 0	0.24±0.06	0.21±0.03	0.22±0.02	
C18 : 0	4.01±0.31	4.18±0.54	4.28±0.31	
C20 : 0	0.09±0.01	0.1±0.01	0.11±0.02	
C21 : 0	0.17±0.04	0.18±0.07	0.16±0.03	
ΣSFA ¹	22.09±1.22	22.65±1.24	24.65±0.9	
C16 : 1	3.33±0.31	3.48±0.55	3.62±0.47	
C18 : 1n9c	40.1±0.84	38.14±1.51	37.71±1.08	
C20 : 1	1.99±0.12	2.03±0.17	2.15±0.27	
C22 : 1n9	0.28±0.06	0.27±0.05	0.29±0.06	
ΣMUFA ²	45.7±0.8	43.91±1.6	43.77±0.94	
C18 : 2n6c	21.15±1.64	20.34±1.02	18.70±0.97	
C18 : 3n6	0.26±0.01 ^a	0.24±0.02 ^{ab}	0.21±0.01 ^b	
C18 : 3n3	1.28±0.09	1.12±0.2	1.05±0.24	
C20 : 2n6	0.55±0.03	0.56±0	0.59±0.03	
C20 : 3n6	1.05±0.06	1.13±0.16	1.08±0.03	
C20 : 4n6 (ARA)	2.02±0.19	1.98±0.51	2.00±0.45	
C20 : 5n3 (EPA)	0.69±0.15	0.89±0.09	0.95±0.12	
C22 : 6n3 (DHA)	5.21±0.79 ^b	7.17±0.86 ^a	6.81±0.99 ^{ab}	
ΣHUFA ³	8.97±1.07	11.18±1.55	11.03±1.26	
ΣPUFA ⁴	32.21±0.83 ^{ab}	33.44±0.37 ^a	31.58±0.07 ^b	
Σn-3PUFA ⁵	7.18±0.85 ^b	9.19±0.69 ^a	9.01±0.56 ^a	
Σn-6PUFA ⁶	25.03±1.60	24.25±0.36	22.57±0.54	
Σn-3/Σn-6	0.29±0.05 ^b	0.38±0.03 ^{ab}	0.40±0.03 ^a	

注: ¹ΣSFA: 饱和脂肪酸总量; ²ΣMUFA: 单不饱和脂肪酸总量; ³ΣHUFA: 高不饱和脂肪酸总量; ⁴ΣPUFA: 多不饱和脂肪酸总量; ⁵Σn-3PUFA: n-3 多不饱和脂肪酸总量; ⁶Σn-6PUFA: n-6 多不饱和脂肪酸总量。同行数据肩标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), 相同或无字母表示差异不显著($P>0.05$)。
Note: ¹ΣSFA: total saturated fatty acids; ²ΣMUFA: total monounsaturated fatty acids; ³ΣHUFA: total highly unsaturated fatty acids; ⁴ΣPUFA: total polyunsaturated fatty acids; ⁵Σn-3PUFA: total n-3 polyunsaturated fatty acids; ⁶Σn-6PUFA: total n-6 polyunsaturated fatty acids. Means with different letters in the same column are significantly different ($P<0.05$), and means with the same or no letter in the same column are not significantly different ($P>0.05$).

2.6 饲料维生素 E 含量对彭泽鲫亲本血清免疫和抗氧化指标的影响

由表 7 可知, 饲料维生素 E 含量对彭泽鲫亲本血清中 SOD 和 ALP 均无显著影响($P>0.05$)。400 mg/kg 组和 1600 mg/kg 组 CAT 和 ACP 显著高于 0 mg/kg 组($P<0.05$); MDA 显著降低($P<0.05$), 但 400 mg/kg 组和 1600 mg/kg 组之间无显著差异($P>0.05$); T-AOC 和 LZM 在 400 mg/kg 组达到峰值, 显著高于 0 mg/kg 组($P<0.05$), 但与 1600 mg/kg 组无显著差异($P>0.05$)。

表 7 饲料中添加不同含量维生素 E 的 3 个实验组中彭泽鲫亲本的血清免疫和抗氧化指标

Tab. 7 Serum immune and antioxidant indexes of *Carassius auratus* var. *Pengze* broodstock cultured at three groups with different contents of dietary vitamin E

指标 indicator	维生素 E 含量/(mg/kg) vitamin E content		
	0	400	1600
总抗氧化/(mmol/L) T-AOC	0.82±0.04 ^b	0.96±0.05 ^a	0.88±0.06 ^{ab}
超氧化物歧化酶/(U/mL) SOD	238.93±5.38	240.36±13.32	250.92±14.66
丙二醛/(nmol/mL) MDA	24.78±3.63 ^a	18.24±0.75 ^b	18.37±2.38 ^b
过氧化氢酶/(U/mL) CAT	2.96±0.52 ^b	5.29±0.71 ^a	6.54±0.68 ^a
溶菌酶/(U/mL) LZM	45.02±8.88 ^b	63.14±4.42 ^a	60.78±5 ^{ab}
碱性磷酸酶/(KU/100mL) ALP	1.74±0.31	2.37±0.40	2.52±0.43
酸性磷酸酶/(KU/100mL) ACP	445.50±32.62 ^b	587.04±59.48 ^a	588.86±34.51 ^a

注: 同行数据肩标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), 相同或无字母表示差异不显著($P>0.05$)。

Note: Means with different letters in the same column are significantly different ($P<0.05$), and means with the same or no letter in the same column are not significantly different ($P>0.05$).

2.7 饲料维生素 E 含量对彭泽鲫亲本肝抗氧化指标的影响

由表 8 可知, 饲料维生素 E 含量对彭泽鲫亲本肝脏中 T-AOC 和 CAT 均无显著影响($P>0.05$)。SOD 活性在 400 mg/kg 组中达到峰值, 显著高于 0 mg/kg ($P<0.05$), 略高于 1600 mg/kg 组 ($P>0.05$)。随着饲料维生素 E 含量增加, 400 mg/kg 和 1600 mg/kg MDA 活性显著低于 0 mg/kg 组 ($P<0.05$)。

表 8 饲料中添加不同含量维生素 E 的 3 个实验组中彭泽鲫亲本肝脏中抗氧化指标

Tab. 8 Liver antioxidant indexes of *Carassius auratus* var. *Pengze* broodstock cultured at three groups with different contents of dietary vitamin E

指标 indicator	维生素 E 含量/(mg/kg) vitamin E content		
	0	400	1600
总抗氧化/(mmol/L) T-AOC	0.21±0.04	0.21±0.01	0.21±0.01
超氧化物歧化酶/(U/mL) SOD	699.72±39.32 ^b	915.26±49.16 ^a	880.64±13.75 ^a
丙二醛/(nmol/mL) MDA	1.23±0.20 ^a	0.69±0.08 ^b	0.55±0.07 ^b
过氧化氢酶/(U/mL) CAT	20.13±3.89	19.78±1.43	17.86±2.88

注: 同行数据肩标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), 相同或无字母表示差异不显著($P>0.05$)。

Note: Means with different letters in the same column are significantly different ($P<0.05$), and means with the same or no letter in the same column are not significantly different ($P>0.05$).

3 讨论

3.1 饲料维生素 E 含量对彭泽鲫亲本生长和性腺发育的影响

有研究表明, 饲料中添加适量维生素 E 可改善草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)^[17]、罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)^[18]和尼罗罗非鱼^[19]幼鱼等的增重率。但在本研究中, 彭泽鲫亲本增重率无显著影响, 这与黄颡鱼(*Pelteobagrus fulvidraco*)^[20]幼鱼、香鱼(*Plecoglossus altivelis*)^[21]仔稚鱼、沙氏若丽鱼(*Pseudotropheus socolofi*)^[22]和黄金锦鲤(*Cyprinus carpio* var. *Golden*)^[23]的研究结果类似, 表明不同物种在不同生长阶段对维生素 E 的作用机制可能存在差异。在黄利娜^[24]对大菱鲆的研究中发现, 不同维生素 E 组对大菱鲆体重增长没有显著差异, 但添加 700 mg/kg 维生素 E 组繁殖性能却都显著高于对照组, 推测在繁殖期营养强化阶段, 营养物质会优先运输到性腺, 用于性腺发育以保证繁殖后代的需要, 导致大菱鲆在增重方面表现不明显。本研究中也发现, 添加 400 mg/kg 维生素 E 的饲料能显著提高性腺指数, 卵径和怀卵量也达到峰值。随着维生素 E 添加量增加到 1600 mg/kg, 大多数性腺发育指标没有进一步增加。与本研究结果一致, 岳华梅

等^[25]在黄鳝中也发现, 添加适量维生素 E 能使性腺指数达到最高水平, 并且更高浓度的维生素 E 则无法进一步提高性腺指数。宋光同等^[26]研究表明, 适量添加维生素 E 可以提高红螯螯虾(*Cherax quadricarinatus*)雌虾的性腺指数。在对纹唇骨唇鱼的研究中也发现, 添加 375 mg/kg 的维生素 E 显著影响性腺指数和卵径^[27]。此外, 本研究发现, 卵巢中的维生素 E 含量与性腺发育指标一致, 400 mg/kg 组中显著高于对照组, 但增加至 1600 mg/kg 时, 卵巢中的维生素 E 含量下降。在罗氏沼虾的研究也有类似发现, 维生素 E 可以在卵巢中积累, 使卵子和早期幼体中维持较高的维生素 E 含量, 从而改善其繁殖性能^[28]。因此, 尽管维生素 E 对生长和增重率没有显著影响, 但其可以显著提高彭泽鲫亲本的性腺发育和卵巢中维生素 E 的沉积, 进而调控性腺的成熟和胚胎的发育^[29]。然而, 过量添加维生素 E 会抑制彭泽鲫亲本的性腺发育, 类似的研究在虾中也有报道^[30], 可能的原因是水产动物在短时间内无法代谢并排出过量维生素 E, 导致其在体内蓄积并产生毒性作用^[31]。

3.2 饲料维生素 E 含量对彭泽鲫亲本卵巢组织氨基酸和脂肪酸组成的影响

胚胎发育、生长所需的能量和营养完全依赖卵黄, 亲本的营养为卵黄提供全部或大多数的必需营养物质, 氨基酸是调节鱼苗性腺发育的重要能源^[32]。目前有大量研究证实, 氨基酸含量会对水生动物性腺发育产生调控作用。研究发现 Trp 能促使其雄鱼精子提早成熟及雌鱼提前排卵^[33]; Lys 含量降低会导致卵黄中蛋白质含量显著降低^[34]; 同样, 有研究发现鱼体缺少 Lys 时, 其产卵率和受精卵孵化率均出现降低^[35]。Glu 则与排氨、三羧酸循环及维生素 E 的抗氧化功能密切相关^[36]。本研究中发现, 饲料中适量添加维生素 E 可以显著提高卵子中 Glu、Val、Ile、Thr 和 Lys 等氨基酸的含量。性腺发育过程中, 卵粒的成熟需要累积更多的氨基酸参与卵黄的生成, 氨基酸积累量越高, 卵巢成熟度就越高^[37]。

性腺在发育时, 脂肪作为重要的细胞膜物质, 为卵母细胞的生长提供物质基础, 脂肪酸不仅可

以调节一些类固醇激素的合成也可经氧化分解产生能量, 为性腺发育提供必要的能量^[38]。虽然 PUFA 调控鱼类繁殖性能的机制十分复杂, 但是有研究发现, LC-PUFAs、性类固醇激素水平是影响鱼类卵黄发生、卵巢成熟的两个重要因素^[39], 鱼类性腺在发育的过程中, 机体中的 LC-PUFAs 通过代谢途径从脂肪组织经由血液转运至肝脏, 从而促进肝合成卵黄蛋白原^[40]。肝合成卵黄蛋白原不仅需要足够多的 LC-PUFAs, 还需要性类固醇激素的诱导作用才能完成^[41]。在对彭泽鲫卵巢脂肪酸分析中发现, 添加适量维生素 E 的实验组中高不饱和脂肪酸含量明显增加, 尤其是 $\Sigma n-3$ PUFA 提高了 28%, $\Sigma n-3$ PUFA 是评价卵巢组织的重要指标。Luo 等^[42]报道, 卵巢中 n-3 PUFA 含量越高, 西伯利亚鲟雌雄亲本的繁殖性能和后代的品质就越好。在对牙鲆的研究中发现, n-3 PUFA 能显著提高牙鲆的繁殖性能^[43]。在斜带石斑亲鱼饵料中添加 0.2% 的维生素 E 时, 受精卵中 n-3PUFA 的含量显著高于对照组^[44]。n-3PUFA 含量的增加与维生素 E 的抗氧化作用也有着直接的关系, 卵巢脂肪酸来源于卵巢的转运, 添加维生素 E 的亲鱼机体的抗氧化性增强, 减少不饱和脂肪酸的氧化, 进而促进动物的性腺成熟、受精、胚胎发育和孵化, 从而保证胚胎发育顺利进行^[31]。所以, 饲料中添加适量维生素 E 可显著促进高不饱和脂肪酸在卵巢中的沉积, 进一步证明维生素 E 对彭泽鲫亲本的卵巢发育有促进作用。

3.3 饲料维生素 E 含量对彭泽鲫亲本血清和肝脏中抗氧化指标的影响

鱼类在早期发育阶段对 PUFA 的需求较高, 但由于其化学结构容易氧化, 这种较高的 PUFA 需求增加了氧化应激的风险, 鱼类胚胎并不具备抗氧化防御机制^[45]。在这种情况下, 鱼类发育和存活就依赖于卵黄储备中存在足够的抗氧化防御能力, 这些抗氧化物质是在卵黄形成过程中由雌鱼沉积的。维生素 E 作为一种重要的脂溶性生物组织抗氧化剂和自由基清除剂, 是防止 PUFA 氧化的有效手段, 能够保护细胞膜不受自由基侵害, 提升机体免疫力和繁殖能力^[46]。T-AOC 的水平可以体现动物机体的总抗氧化能力, 包括抗氧

化酶系统和非酶促系统^[47]。本研究中, 400 mg/kg 组血清 T-AOC 显著高于 0 mg/kg 组。但随着饲料维生素 E 含量增加到 1600 mg/kg, 血清 T-AOC 略有降低, 与在胭脂鱼中观察到的现象一致^[8]。这可能是由于摄入过多的维生素 E 导致其在体内不再起到抗氧化作用, 反而会促进氧化^[48], 或是由于过多的维生素 E 抑制了抗氧化酶的活性, 从而导致血清 T-AOC 下降^[46], 其机制尚不完全明确。Lee 等^[49]发现, 斑节对虾(*Penaeus monodon*)血清超氧化物歧化酶活性随着维生素 E 添加量升高出现先升后降的趋势。而维生素 E 对皱纹盘鲍(*Haliotis discus hannai*)血清超氧化物歧化酶活性无显著影响^[50]。黄金锦鲤的研究中也发现, 随着维生素 E 含量的增加, 其肝脏超氧化物歧化酶活性呈先升后降的趋势, 而血清中超氧化物歧化酶活性无显著影响^[23], 该结果和本研究结果一致。过量自由基能诱发细胞膜中多不饱和脂肪酸的过氧化, 生成脂质过氧化物, 并最终分解成丙二醛, 因此, 丙二醛含量既可作为机体脂质过氧化程度评判标准, 也可间接反映机体自由基的产生与清除平衡系统、抗氧化酶活性及其抗氧化能力的强弱^[51]。Garg 等^[52]发现饲料维生素 E 能显著降低丙二醛含量。本研究结果也显示, 肝脏和血清中 MDA 含量均随着维生素 E 含量的增加而显著降低, 最后趋于平稳。溶菌酶(LZM)是鱼类重要的非特异性免疫酶, 饲料中添加适量的维生素 E 会增加军曹鱼(*Rachycentron canadum*)^[53]、点带石斑鱼(*Epinephelus malabaricus*)^[54]和黄颡鱼^[55]的 LZM 活性。在本研究中也发现, 添加 400 mg/kg 维生素 E 后, 血清 LZM 的浓度显著上升。这说明饲料中添加适量的维生素 E 在提高彭泽鲫亲本性腺发育的同时, 对其非特异性免疫能力也有显著的提高。

4 结论

综上所述, 在本研究中, 饲料中 400 mg/kg 的维生素 E 的添加量可显著提高彭泽鲫亲本的性腺指数和卵巢中维生素 E 含量, 有利于氨基酸和脂肪酸的沉积并增加血清和肝脏中免疫和抗氧化酶活力, 从而改善彭泽鲫亲本性腺发育。

参考文献:

- [1] Dong C J, Li X J, Sun X W. Research progress of the genetic diversity, origin and evolution of *Carassius auratus* in China[J]. Journal of Fisheries of China, 2020, 44(6): 1046-1062. [董传举, 李学军, 孙效文. 我国鲫种群遗传多样性及起源进化研究进展[J]. 水产学报, 2020, 44(6): 1046-1062.]
- [2] Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Announcement of the Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China No.687. [农业农村部, 中华人民共和国农业农村部公告 第 687 号] [http://www.moa.gov.cn/govpublic/YYJ/202307/t20230725_6432818.htm](http://www.moa.gov.cn/govpubblic/YYJ/202307/t20230725_6432818.htm)
- [3] Li T L, Xing W, Xu G L, et al. Effects of dietary vitamin C on reproduction performance and offspring larval quality of goldfish *Carassius auratus*[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2022, 37(5): 732-738. [李铁梁, 邢薇, 徐冠玲, 等. 维生素 C 对龙睛金鱼亲鱼繁殖性能、免疫及后代仔鱼质量的影响[J]. 大连海洋大学学报, 2022, 37(5): 732-738.]
- [4] Wang X Y, Wang J Y, Ma J J, et al. Effects of dietary vitamin E and L-carnosine on growth performance, antioxidant status, non-specific immunity and serum biochemical indices in juvenile turbot (*Scophthalmus maximus*)[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2017, 41(1): 86-94. [王晓艳, 王际英, 马晶晶, 等. VE 和 L-肌肽对大菱鲆幼鱼生长、抗氧化、非特异性免疫及血清生化指标的影响[J]. 水生生物学报, 2017, 41(1): 86-94.]
- [5] Jobling M. National research council (NRC): Nutrient requirements of fish and shrimp[J]. Aquaculture International, 2012, 20(3): 601-602.
- [6] Rimbach G, Minihane A M, Majewicz J, et al. Regulation of cell signalling by vitamin E[J]. Proceedings of the Nutrition Society, 2002, 61(4): 415-425.
- [7] Chang J, Niu H X, Hu Z F, et al. Requirement of dietary vitamin E for juvenile manchurian trout (*Brachymystax lenok*)[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2017, 29(11): 4085-4092. [常杰, 牛化欣, 胡宗福, 等. 细鳞鲈幼鱼对饲料中维生素 E 的需求量[J]. 动物营养学报, 2017, 29(11): 4085-4092.]
- [8] Zhang Z Q, Jiang M, Wen H, et al. Dietary vitamin E requirement of juvenile Chinese sucker (*Myxocyprinus asiaticus*)[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2017, 45(2): 23-30, 36. [张志强, 蒋明, 文华, 等. 胭脂鱼幼鱼对饲料中维生素 E 需要量的研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(2): 23-30, 36.]
- [9] Xiao D Y, Liang M Q, Wang X X, et al. Effects of different

- levels of dietary vitamin E on the reproductive performance and offspring quality of tongue sole *Cynoglossus semilaevis*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2015, 36(2): 125-132. [肖登元, 梁萌青, 王新星, 等. 饲料中添加不同水平的维生素 E 对半滑舌鲷(*Cynoglossus semilaevis*)亲鱼繁殖性能及后代质量的影响[J]. 渔业科学进展, 2015, 36(2): 125-132.]
- [10] Zhang G H, He R G, Zhang S P, et al. Effect of vitamin e in broodstock diet on reproductive performance of *Monopterus albus*[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2007, 31(2): 196-200. [张国辉, 何瑞国, 张世萍, 等. 维生素 E 对黄鳝繁殖性能的影响[J]. 水生生物学报, 2007, 31(2): 196-200.]
- [11] Huo H H, Li H T, Wang W F, et al. Effects of vitamin E on α -tocopherol transfer protein expression in the pituitary of *Cynoglossus semilaevis*[J]. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(1): 60-69. [霍欢欢, 李会涛, 王蔚芳, 等. 维生素 E 对半滑舌鲷垂体 α -生育酚转移蛋白基因表达的影响[J]. 渔业科学进展, 2024, 45(1): 60-69.]
- [12] Palace V P, Werner J. Vitamins A and E in the maternal diet influence egg quality and early life stage development in fish: A review[J]. Scientia Marina, 2006, 70(S2): 41-57.
- [13] Li K S, Wang F R, Xie Z G, et al. Application and research progress of vitamin E in aquatic animals[J]. China Feed, 2016(24): 26-29, 34. [李可胜, 王芙蓉, 谢中国, 等. 维生素 E 在水产动物中的应用及研究进展[J]. 中国饲料, 2016(24): 26-29, 34.]
- [14] Wang J Y, Li B S, Liu X D, et al. Dietary vitamin A, ascorbic acid and α -tocopherol affect the gonad development and reproductive performance of starry flounder *Platichthys stellatus* broodstock[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2014, 32(2): 326-333.
- [15] Wu X B, Yang D G, Yang S R, et al. Effects of adding nutrient sources on growth and gonadal development of *Coreius guichenoti*[J]. Freshwater Fisheries, 2023, 53(1): 27-32. [吴兴兵, 杨德国, 杨少荣, 等. 几种营养源的附加对圆口铜鱼(*Coreius guichenoti*)亲鱼生长与性腺发育的影响[J]. 淡水渔业, 2023, 53(1): 27-32.]
- [16] Zhang X, Tang Z Y, Huang K, et al. Effects of dietary vitamin E on growth and gonadal development in Nile tilapia *Oreochromis niloticus*[J]. Fisheries Science, 2020, 39(6): 887-893. [张旭, 唐瞻杨, 黄凯, 等. 维生素 E 对尼罗罗非鱼生长和性腺发育影响的研究[J]. 水产科学, 2020, 39(6): 887-893.]
- [17] Yao K, Feng L, Jiang W D, et al. The role of vitamin E in polyunsaturated fatty acid synthesis and alleviating endoplasmic reticulum stress in sub-adult grass carp (*Ctenopharyngodon idella*)[J]. Animal Nutrition, 2024, 16: 275-287.
- [18] Shan F, Liu B, Sun C X, et al. Effects of dietary vitamin E content on growth performance, serum biochemical indices and muscle quality of giant freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*)[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(1): 214-225. [单凡, 刘波, 孙存鑫, 等. 饲料维生素 E 含量对罗氏沼虾生长性能、血清生化指标和肌肉品质的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(1): 214-225.]
- [19] Taalab H A, Mohammady E Y, Hassan T M M, et al. β -Carotene of *Arthrospira platensis* versus vitamin C and vitamin E as a feed supplement: Effects on growth, haematobiochemical, immune-oxidative stress and related gene expression of Nile tilapia fingerlings[J]. Aquaculture Research, 2022, 53(13): 4832-4846.
- [20] Chen C, Xiong J, Zuo Y S, et al. Effects of vitamin E levels on growth performance and immune function of juvenile *Pelteobagrus fulvidraco*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2010, 17(3): 521-526. [陈骋, 熊晶, 左永松, 等. 饲料中不同维生素 E 添加量对黄颡鱼幼鱼生长性能及免疫功能的影响[J]. 中国水产科学, 2010, 17(3): 521-526.]
- [21] Wang X, Li J. Effects of vitamin E level in feedstuff on growth performance and antioxidant enzyme activity in sweetfish (*Plecoglossus altivelis*) larvae and juveniles[J]. Feed Industry, 2021, 42(12): 49-53. [王旭, 李娟. 饲料中维生素 E 不同添加水平对香鱼仔稚鱼生长性能及抗氧化酶活力的影响[J]. 饲料工业, 2021, 42(12): 49-53.]
- [22] Erdogan M, Arslan T. Effects of vitamin E on growth and reproductive performance of pindani (*Pseudotropheus socolofi* Johnson, 1974)[J]. Aquaculture, 2019, 509: 59-66.
- [23] Jin X, Lu Z Y, Zhang Y Y, et al. Effect of dietary levels of vitamin E on growth performance, antioxidant indices and body color of koi *Cyprinus carpio*[J]. Fisheries Science, 2023, 42(6): 1040-1046. [金鑫, 卢正义, 张媛媛, 等. 维生素 E 对黄金锦鲤生长、抗氧化指标及体色的影响[J]. 水产科学, 2023, 42(6): 1040-1046.]
- [24] Huang L N. Effect of different levels vitamin A, vitamin E in broodstock diet on reproductive performance of turbot (*Scophthalmus maximus*)[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2012. [黄利娜. 饲料中不同水平维生素 A、E 对大菱鲆繁殖性能的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2012.]
- [25] Yue H M, Fu P, Deng H C, et al. Effect of dietary zinc, selenium, and vitamin E on the growth and antioxidant activity of female *Monopterus albus*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2023, 30(3): 352-360. [岳华梅, 符鹏, 邓海

- 超, 等. 微量元素锌、硒及维生素 E 对雌性黄鳝生长及抗氧化能力的影响[J]. 中国水产科学, 2023, 30(3): 352-360.]
- [26] Song G T, Ding F Q, Wu S, et al. Effects of dietary vitamin C, vitamin E and highly unsaturated fatty acids on reproductive performance of swamp red crayfish *Procambarus clarkii*[J]. Fisheries Science, 2015, 34(1): 43-47. [宋光同, 丁凤琴, 武松, 等. 维生素 C、E 及高度不饱和脂肪酸交互作用对克氏原螯虾繁殖性能的影响[J]. 水产科学, 2015, 34(1): 43-47.]
- [27] Tarigan N, Supriatna I, Setiadi M A, et al. The effect of vitamin E supplement in the diet on gonad maturation of nillem (*Osteochilus hasselti*, CV)[J]. Jurnal Perikanan Universitas Gadjah Mada, 2017, 19(1): 1.
- [28] Cavalli R O, Batista F M M, Lavens P, et al. Effect of dietary supplementation of vitamins C and E on maternal performance and larval quality of the prawn *Macrobrachium rosenbergii*[J]. Aquaculture, 2003, 227(1-4): 131-146.
- [29] Yuan C, Lu Z L, Huang B S, et al. *Procambarus clarkii* breeding technology and prospects in Guangxi[J]. Fishery Information & Strategy, 2021, 36(4): 267-274. [袁畅, 陆专灵, 黄彬胜, 等. 广西地区克氏原螯虾繁育技术及展望[J]. 渔业信息与战略, 2021, 36(4): 267-274.]
- [30] Wang N, Deng K Y, Deng D, et al. A review: Research progress on nutritional requirement of shrimp broodstock[J]. China Feed, 2022(22): 52-59. [王宁, 邓康裕, 邓登, 等. 亲虾营养需求的研究进展[J]. 中国饲料, 2022(22): 52-59.]
- [31] Zhao L, Li Z Q, Wang S, et al. Application and prospect of vitamin E in aquaculture[J]. South China Agriculture, 2020, 14(2): 160-163. [赵琳, 李泽群, 王帅, 等. 维生素 E 在水产养殖中的应用与展望[J]. 南方农业, 2020, 14(2): 160-163.]
- [32] Tan Q S, Wu F, Du H, et al. Effects of broodstock nutrition on reproductive performance of fish: A review[J]. Journal of Hydroecology, 2016, 37(4): 1-9. [谭青松, 吴凡, 杜浩, 等. 饲料营养对亲鱼生殖性能的影响研究进展[J]. 水生生态学杂志, 2016, 37(4): 1-9.]
- [33] Lopez de Onate R, Giammanco S, Carollo F, et al. Effects of a short-term diet of precooked corn flour on the vaginal cycle, in rats placed in various conditions of environmental illumination[J]. Bollettino Della Societa Italiana Di Biologia Sperimentale, 1989, 65(3): 227-233.
- [34] Baginsky M L, Stout C D, Vacquier V D. Diffraction quality crystals of lysin from spermatozoa of the red abalone (*Haliotis rufescens*)[J]. Journal of Biological Chemistry, 1990, 265(9): 4958-4961.
- [35] Shi L D, Ren T J, Han Y Z. Research progress of nutrients regulating reproductive performance of aquaculture animals: A review[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2020, 35(4): 620-630. [石立冬, 任同军, 韩雨哲. 水产动物繁殖性能的营养调控研究进展[J]. 大连海洋大学学报, 2020, 35(4): 620-630.]
- [36] Tian H M, Zhao Y L, Li J J, et al. Biochemical changes during embryonic development in the crab *Eriocheir sinensis*[J]. Chinese Journal of Zoology, 2002, 37(5): 18-21. [田华梅, 赵云龙, 李晶晶, 等. 中华绒螯蟹胚胎发育过程中主要生化成分的变化[J]. 动物学杂志, 2002, 37(5): 18-21.]
- [37] Zhou H. Studies on the function and the related mechanism of lipid on gonadal development of female Chinese sturgeon (*Acipenser sinensis*)[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018. [周海. 脂肪在中华鲟雌性腺发育过程中的作用及其相关机制研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018.]
- [38] 杨影, 廖晨蕾, 王力, 等. 高脂日粮添加胆汁酸对大口黑鲈生长性能、脂代谢和胆汁酸代谢的调节作用[J]. 中国水产科学, 2023, 30(7): 863-877. [Yang Y, Liao C L, WANG L, et al. Effects of dietary bile acid on growth performance, bile acid metabolism and lipid metabolism in largemouth bass (*Micropterus salmoides*) fed high-fat diets[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2023, 30(7): 863-877.]
- [39] Wen H S, Lin H R. Effect of environmental factors on gonadal maturation as well as its ovulation and spawning in teleosts[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(1): 151-155. [温海深, 林浩然. 环境因子对硬骨鱼类性腺发育成熟及其排卵和产卵的调控[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 151-155.]
- [40] Bransden M P, Battaglene S C, Goldsmid R M, et al. Broodstock condition, egg morphology and lipid content and composition during the spawning season of captive striped trumpeter, *Latris lineata*[J]. Aquaculture, 2007, 268(1-4): 2-12.
- [41] Lubzens E, Young G, Bobe J, et al. Oogenesis in teleosts: How fish eggs are formed[J]. General and Comparative Endocrinology, 2010, 165(3): 367-389.
- [42] Luo L, Ai L C, Liang X F, et al. N-3 Long-chain polyunsaturated fatty acids improve the sperm, egg, and offspring quality of Siberian sturgeon (*Acipenser baerii*)[J]. Aquaculture, 2017, 473: 266-271.
- [43] Furuita H, Tanaka H, Yamamoto T, et al. Effects of n-3 HUFA levels in broodstock diet on the reproductive performance and egg and larval quality of the Japanese flounder, *Paralichthys olivaceus*[J]. Aquaculture, 2000, 187(3-4): 387-398.

- [44] Xiao W P, Liu Y J, Tian L X, et al. Effect of vitamin E and vitamin C on spawning quality of broodstock for grouper *Epinephelus coioides*[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2003, 42(S2): 214-217. [肖伟平, 刘永坚, 田丽霞, 等. 维生素 E 和维生素 C 对斜带石斑鱼亲鱼产卵质量的影响[J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2003, 42(S2): 214-217.]
- [45] Arslan M, Alaybasi S, Altun E, et al. Changes in lipids, fatty acids, lipid peroxidation and antioxidant defence system during the early development of wild brown trout (*Salmo trutta*)[J]. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2016, 16: 703-714.
- [46] Yue H M, Fu P, Deng H C, et al. Effect of dietary zinc, selenium, and vitamin E on the growth and antioxidant activity of female *Monopterus albus*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2023, 30(3): 352-360. [岳华梅, 符鹏, 邓海超, 等. 微量元素锌、硒及维生素 E 对雌性黄鳝生长及抗氧化能力的影响[J]. 中国水产科学, 2023, 30(3): 352-360.]
- [47] Zhai H Y, Zhang L, Cai Q X, et al. Effects of dietary vitamin E on growth, anti-oxidation and immunity of hybrid grouper juveniles (*Epinephelus fuscoguttatus*♀×*E. lanceolatus*♂)[J]. Journal of Fisheries of China, 2023, 47(12): 111-122. [翟浩云, 张璐, 蔡亲晓, 等. 维生素 E 对虎龙杂交斑生长、抗氧化及免疫功能的影响[J]. 水产学报, 2023, 47(12): 111-122.]
- [48] Welker T L, Congleton J L. Effect of dietary alpha-tocopherol+ascorbic acid, selenium, and iron on oxidative stress in sub-yearling Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha* Walbaum)[J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2009, 93(1): 15-25.
- [49] Lee M H, Shiau S Y. Vitamin E requirements of juvenile grass shrimp, *Penaeus monodon*, and effects on non-specific immune responses[J]. Fish & Shellfish Immunology, 2004, 16(4): 475-485.
- [50] Wan M, Mai K S, Ma H M, et al. Effects of dietary selenium and vitamin E on antioxidant enzyme activities in abalone, *Haliotis discus Hannai* ino[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2004, 28(5): 496-503. [万敏, 麦康森, 马洪明, 等. 硒和维生素 E 对皱纹盘鲍血清抗氧化酶活力的影响[J]. 水生生物学学报, 2004, 28(5): 496-503.]
- [51] Viarengo A, Canesi L, Martinez P G, et al. Pro-oxidant processes and antioxidant defence systems in the tissues of the Antarctic scallop (*Adamussium colbecki*) compared with the Mediterranean scallop (*Pecten jacobaeus*)[J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part B: Biochemistry and Molecular Biology, 1995, 111(1): 119-126.
- [52] Garg D P, Bansal A K, Malhotra A, et al. Methomyl induced hematological and biochemical alterations—protection by vitamin E[J]. Pesticide Biochemistry and Physiology, 2009, 93(3): 127-132.
- [53] Zhou Q C, Wang L G, Wang H L, et al. Dietary vitamin E could improve growth performance, lipid peroxidation and non-specific immune responses for juvenile cobia (*Rachycentron canadum*)[J]. Aquaculture Nutrition, 2013, 19(3): 421-429.
- [54] Lin Y H, Shiau S Y. Dietary vitamin E requirement of grouper, *Epinephelus malabaricus*, at two lipid levels, and their effects on immune responses[J]. Aquaculture, 2005, 248(1-4): 235-244.
- [55] Lu Y, Liang X P, Jin M, et al. Effects of dietary vitamin E on the growth performance, antioxidant status and innate immune response in juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. Aquaculture, 2016, 464: 609-617.

Effects of dietary vitamin E on growth, reproduction and nutrient composition, antioxidant immunity and tissue vitamin E content of Pengze crucian carp (*Carassius auratus* var. Pengze) broodstock

XIAO Jun^{1,2}, LONG Fan^{1,2}, DING Liyun^{1,2}, ZHAO Jun³, YAO Yuan^{1,2}, WU Weihua^{1,2}, FU Yilong^{1,2}, CHEN Wenjing^{1,2}

1. Jiangxi Fisheries Research Institute, Nanchang 330039, China;

2. Experimental Station of Lake Fishery Resources and Environment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanchang 330039, China;

3. College of Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

Abstract: To investigate the impact of varying protein levels in feed on the growth performance, ovarian amino acid and fatty acid composition, gonad development, and serum hormone deposition of pengze crucian carp (*Carassius auratus* var. Pengze) broodstock, 135 broodstock with an average initial weight of (256.30±4.70) g were randomly selected for the experiment. These fish were then divided into three groups, each with three replicates and 15 individuals in each replicate. Fish and soybean meals were the primary protein sources, while corn starch was used to adjust the protein gradient, with dietary vitamin E content at 0 mg/kg (68.1 mg/kg), 400 mg/kg (462.3 mg/kg), and 1600 mg/kg (1655.8 mg/kg). The experiment was conducted for 60 days. No significant difference was observed in the growth, survival rate, and weight gain rate of Pengze crucian carp ($P>0.05$). The fattening degree showed a significant increase and a stable trend with the increase in vitamin E in the feed. The gonadal index of the 400 mg/kg group was significantly higher than that of the remaining two groups ($P<0.05$), and the egg diameter and number of eggs conceived showed an increasing trend and a decrease with an increase in vitamin E ($P>0.05$). In the liver, vitamin E content in the 1600 mg/kg group was significantly higher than that in the remaining two groups ($P<0.05$). In the ovaries, the vitamin E content in the 400 and 1600 mg/kg groups was significantly higher than that in the 0 mg/kg group ($P<0.05$). The addition of vitamin E significantly increased the total amount of essential amino acids in the ovary ($P<0.05$). Valine, isoleucine, threonine, lysine, and the total essential amino acids in the 400 mg/kg group were significantly higher than those in the 1600 mg/kg group ($P<0.05$). Histidine, glutamic acid, and total amino acids were significantly higher in the 1600 mg/kg group than in the remaining two groups ($P<0.05$); however, no significant difference was observed in the total non-essential amino acids between the groups ($P>0.05$); seven saturated fatty acids, four monounsaturated fatty acids, and eight polyunsaturated fatty acids were detected in the ovaries of the various groups ($P<0.05$). Polyunsaturated fatty acids, C18:3n6, and Σ PUFA were significantly lower in the 1600 mg/kg group than in the remaining two groups ($P<0.05$), whereas DHA and Σ n-3PUFA peaked in the 400 mg/kg group and were significantly higher than those in the 0 mg/kg group ($P<0.05$), but did not differ significantly from the 1600 mg/kg group ($P>0.05$). In the serum, CAT, ACP, and VTG were significantly higher in the 400 and 1600 mg/kg groups than in the 0 mg/kg group ($P<0.05$), and MDA was significantly lower ($P<0.05$), while T-AOC and LZM reached their peaks in the 400 mg/kg group and were significantly higher than that in the 0 mg/kg group ($P<0.05$). In the liver, the SOD activity peaked in the 400 mg/kg group and was significantly higher than that in the 0 mg/kg ($P<0.05$), and MDA activity decreased significantly with increasing feed vitamin E levels ($P<0.05$). In conclusion, the addition of 400 mg/kg vitamin E in the diet significantly increased the gonad index and vitamin E content in the ovary of Pengze crucian carp, which was beneficial to the deposition of amino acids and fatty acids and increased the immune and antioxidant enzyme activities in serum and liver, thereby improving the gonadal development of Pengze crucian carp.

Key words: vitamin E; Penze crucian carp broodstock; gonadal index; antioxidant enzymes

Corresponding author: DING Liyun. E-mail:dingliyun2008@163.com