

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2020.20070

不同脂肪源日粮补充维生素 E 对罗氏沼虾生长、免疫及肉品质的影响

孙存鑫¹, 熊哲², 周群兰^{1,2}, 宋长友¹, 单凡², 刘波^{1,2}, 徐宏琴³

1. 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心, 农业农村部淡水渔业和种质资源利用重点实验室, 江苏 无锡 214081;

2. 南京农业大学无锡渔业学院, 江苏 无锡 214081;

3. 江苏富裕达粮食制品有限公司, 江苏 高邮 225600

摘要: 本研究旨在完善罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)饲料配方, 降低罗氏沼虾饲料成本。研究采用 3×2 双因素设计, 配制 6 组饲料, 分别包含鱼油(fish oil, FO)、豆油(soybean oil, SO)、菜籽油(rape seed oil, RO)三种脂肪源; 200 mg/kg (200VE)和 600 mg/kg (600VE)两个维生素 E (VE)水平。养殖实验在温室水泥池中进行, 每个处理 3 个重复, 养殖期 8 周, 每天定点定量投喂 3 次。结果显示, 相对于 FO 组, SO 和 RO 组增重率、特定生长率显著升高, 饵料系数显著下降($P<0.05$), 而 VE 对生长性能和饲料利用无显著影响($P>0.05$)。对于血淋巴抗氧化指标, 在相同 VE 水平下, FO 组血淋巴总抗氧化能力(T-AOC)和超氧化物歧化酶(SOD)活性均显著低于 SO 和 RO 组, 谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)活性均显著高于 SO 和 RO 组($P<0.05$), SO 组丙二醛(MDA)水平均显著低于 FO 和 RO 组($P<0.05$)。在相同脂肪源下, 600VE 可显著提高 FO 组 T-AOC 活性, RO 组 GPX 活性以及 SO 和 RO 组 SOD 活性($P<0.05$), 而 VE 水平对 MDA 含量无显著影响($P>0.05$)。对于血淋巴生理生化指标, 谷草转氨酶(AST)、总蛋白(TP)、白蛋白(ALB)和甘油三酯(TC)受日粮影响显著($P<0.05$); AST 和 ALB 受氮氮应激影响显著($P<0.05$)。此外, 日粮脂肪源和 VE 水平对肉质也有显著影响。其中, SO 组肌肉鲜度和滋味强度较高; RO 组鱼腥味较低; FO 组肌肉亮度较高, 气味强度较低。在 200 mg/kg VE 水平下, FO 组肌肉硬度、胶黏性、耐咀嚼性、黏性和回复性显著高于植物油组($P<0.05$); RO 组的肌肉蒸煮损失显著高于其余组($P<0.05$)。600VE 水平可明显提高肌肉嫩度和多汁性($P<0.05$), 而对肌肉蒸煮损失和滴水损失无显著影响($P>0.05$)。上述结果表明, 相对于鱼油, 豆油和菜籽油等植物油是罗氏沼虾更优质的脂肪源, VE 在以鱼油为单一脂肪源的饲料中有一定的促生长和缓解应激的作用, 且脂肪源和 VE 均显著影响肌肉品质。本研究结果将为降低鱼油在罗氏沼虾饲料中的使用提供数据支持。

关键词: 脂肪源; 维生素 E; 生长; 免疫; 肉品质; 罗氏沼虾

中图分类号: S963

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2020)07-0801-14

脂肪是维持生物体正常生长发育重要的营养和能量物质, 同时也是胚胎发育过程中组织、器官的构建物。对于甲壳类动物, 脂质更与蜕皮、生殖等生命活动密切相关。由于不同脂肪源的脂肪酸组成和不同养殖动物的必需脂肪酸需求均存在

差异。因此, 在水产养殖中脂肪源在不同养殖种类间应用效果相差较大。研究表明, 饲料中使用不适宜的脂肪源甚至会导致机体脂肪代谢紊乱, 造成氧化应激损伤, 最终抑制生长^[1-2]。一般情况下, 氧化应激损伤主要指机体受环境、营养等因

收稿日期: 2020-03-16; 修订日期: 2020-04-10.

基金项目: 国家重点研发计划专项(2019YFD0900200); 国家现代农业产业技术体系项目(CAS-48); 江苏省自然科学基金青年基金(BK20180172); 中国水产科学研究院淡水渔业研究中心基本科研业务费(2018JBFR02); 江苏省“六大人才高峰”高层次人才项目(NY-174); 江苏扬州现代农业科技项目(YZ2019031); 江苏高邮现代农业科技项目(GY201815).

作者简介: 孙存鑫, 博士, 助理研究员, 从事动物营养研究. E-mail: suncx@ffrc.cn

通信作者: 刘波, 博士, 研究员, 从事动物营养研究. E-mail: liub@ffrc.cn

子刺激后导致机体活性氧(ROS)增加, 机体氧化还原平衡被打破, 最终导致细胞和组织损伤^[3]。其中, 脂肪酸不均衡是重要的氧化应激诱导因子。研究指出, 脂肪酸作为组成细胞磷脂双分子层的重要组成, 其发生过氧化反应会造成细胞结构和功能损伤, 进一步则会导致细胞因子分泌异常, ROS 生成增加, 最终在体内形成恶性循环加重脂质代谢紊乱和氧化应激损伤^[4]。进一步研究发现, 鱼类摄食脂肪酸不均衡日粮不仅会造成细胞内线粒体损伤, 提高细胞凋亡率, 还会提高体内炎症因子的基因表达量, 降低抗氧化酶活性^[5-6]。因此, 机体抗氧化机能是衡量脂肪源优劣的重要指标。

此外, 饲料脂肪源对鱼肉品质也有显著影响。在虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)上的研究发现, 在饲料中添加亚麻酸对鱼片的颜色、气味和油腻度等感官指标均有影响^[7]。在大菱鲆(*Psetta maxima*)的研究上发现, 在饲料中用大豆油和亚麻籽油替代鱼油可显著影响鱼肉的气味、颜色和口感, 并且这些差异都是可逆的^[8]。在大西洋鳕(*Gadus morhua*)上的研究发现, 用大豆油替代鱼油可减少鱼肉开裂, 且并不影响口感^[9]。在金头鲷(*Sparus aurata*)和丁鲷(*Tinca tinca* L.)的研究发现, 饲料中鱼油被大豆油替代后肌肉中醛类物质会升高, 并会产生轻微的泥土味^[10-11]。然而, 饲料脂肪源对虾肉品质的影响还鲜有研究。

维生素 E (vitamin E, VE)是一种脂溶性维生素, 可通过抗氧化作用维持细胞膜磷脂双分子层的稳定。当生物膜受自由基攻击时, VE 能与 ROS 的含氧基团发生氧化还原反应阻断过氧化物生成。在日本沼虾(*Macrobrachium nipponense*)^[12]、罗氏沼虾(*Macrobrachium rosenbergii*)^[13]和银色小长臂虾(*Palaemonetes argentinus*)^[14]上的研究表明, 维生素 E 具有显著的增强特异性免疫和抗应激的作用。此外, VE 对氧化脂肪和高脂日粮导致的氧化应激具有一定的缓解作用^[13, 15-16]。VE 还可通过抑制肌肉中的磷脂酶 A2 降低组织脂肪酸氧化, 从而改善肉质和风味^[17]。在吉富罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)^[18]、大西洋白姑鱼(*Argyrosomus regius*)^[19]、斑点叉尾鲷(*Ictalurus punctatus*)^[20]、罗氏沼虾^[13]等多个养殖种类上已证明日粮中添加 VE 可改善

肌肉质构指标及风味。然而, VE 在免疫增强和肉质改善方面与脂肪源的交互影响还未见报道。

本研究实验对象为罗氏沼虾, 该种类自 20 世纪 70 年代引入中国以来已在中国华东和华南地区广泛养殖, 2018 年产量已达 133000 t^[21]。已有研究发现, 使用单一或混合植物油, 如豆油、葵花籽油、椰子油、棕榈油、蓖麻油、玉米油和菜籽油等替代鱼油可起到相近的促生长效果, 其中, 豆油和菜籽油的效果最好^[22-24]。然而, 已有研究主要集中在对虾生长性能的评定, 而对虾肉品质和抗氧化抗应激能力缺乏相关研究。因此, 本研究旨在通过研究不同脂肪源添加 VE 对罗氏沼虾生长、肉品质和免疫的影响, 为科学优化罗氏沼虾饲料配制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 实验饲料

实验采用 3×2 双因素设计, 包含 3 种脂肪源和 2 个 VE 水平。设 6 组等氮等能饲料, 分别包含 6%豆油和 200 mg/kg VE (200SO)、6%豆油和 600 mg/kg VE (600SO)、6%菜籽油和 200 mg/kg VE (200RO)、6%菜籽油和 600 mg/kg VE (600RO)、6%鱼油和 200 mg/kg VE (200FO)以及 6%鱼油和 600 mg/kg VE (600FO)。实验配方如表 1 所示, 其中, 酪蛋白、明胶和鱼粉为蛋白源, 糊精和 α -淀粉为糖源, 鱼油、豆油和菜籽油为脂肪源。

实验饲料在中国水产科学研究院淡水渔业研究中心实验室制作。主要原料经粉碎过 80 目筛后, 称重并逐级混匀, 最后加油脂和 30%的水充分混匀。用双螺杆挤条机(F-26, 广州华工光电科技有限公司, 广东)进行质粒, 饲料粒径为 1.0 mm 和 2.0 mm, 分别用于投喂不同生长阶段的罗氏沼虾。饲料于阴凉处风干后储存于-20℃备用。

1.2 实验用虾与饲养管理

实验虾购于浙江南太湖淡水水产种业有限公司(浙江湖州), 养殖地点为浙江南太湖淡水水产种业有限公司温室大棚水泥池。将实验虾置于水泥池(2 m×2 m×0.5 m)中暂养两周, 暂养期内使用商品日粮定点投于水泥池内的食盘上进行驯化, 待虾稳定后选择体质强健、活泼有力、规格相近

表 1 实验罗氏沼虾日粮组及其概略组成

Tab. 1 Formulation and proximate composition of the experimental diets for *Macrobrachium rosenbergii*

%, 干重 dry matter basis						
原料 ingredient	200SO	600SO	200RO	600RO	200FO	600FO
酪蛋白(不含维生素) casein (vitamin free)	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00
明胶 gelatin	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
鱼粉 fish meal	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00	22.00
糊精 dextrin	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
α -淀粉 α -starch	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
豆油 soybean oil	6.00	6.00	0	0	0	0
菜籽油 rapeseed oil	0	0	6.00	6.00	0	0
鱼油 fish oil	0	0	0	0	6.00	6.00
微晶纤维素 microcrystalline cellulose	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
羧甲基纤维素 carboxy-methyl cellulose	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
磷脂粉 phosphatide powder	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
胆固醇 cholesterol	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
蜕壳素 ecdysone	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
二甲基- β -丙酸噻亨 dimethyl- β -propiethetin hydrochloride	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
氯化胆碱(50%) choline chloride	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
维生素预混料(不加维生素 E) vitamin premix (vitamin E free)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
矿物质预混料 mineral premix	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
磷酸二氢钙 calcium dihydrogen phosphate	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
膨润土 bentonite	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53	1.53
维生素 E vitamin E	0.02	0.06	0.02	0.06	0.02	0.06
概略组成% proximate composition						
水分 moisture	5.34	4.21	4.05	3.81	3.98	4.22
粗蛋白质 crude protein	40.90	41.21	40.80	40.98	41.60	41.25
粗脂肪 ether extract	9.86	9.67	9.55	9.54	9.33	9.66
粗灰分 crude ash	9.54	9.64	9.37	9.25	9.68	9.35

注: 1. 明胶、鱼粉、豆油、菜籽油、鱼油、大豆磷脂粉、胆固醇、膨润土、维生素 E、磷酸二氢钙购自无锡通威饲料有限公司; 2. 酪蛋白购自内蒙古呼伦贝尔三元乳业有限公司; 3. 蜕壳素、诱食剂、氯化胆碱、维生素添加剂、矿物质添加剂购自江苏富裕达粮食制品股份有限公司; 4. 每千克维生素预混料包含以下维生素: 视黄醇 1.5 g, 硫胺素 1.3 g, 核黄素 2.0 g, 吡哆素 2.4 g, 钴胺素 0.8 g, 抗坏血酸 40.0 g, 胆钙化醇 0.5 g, 甲萘醌 3.5 g, 烟酰胺 3.6 g, 叶酸 0.4 g, *D*-生物素 0.8 g, 肌醇 12.5 g; 5. 每千克矿物质预混料包含以下矿物质: 沸石粉 352.8 g, 苕糠粉 267.4 g, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 10 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 150 g, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 66.7 g, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 34.8 g, KCl 23.6 g, $\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 9.4 g, $\text{CaH}_4\text{I}_2\text{O}_6$ 6.5 g, Na_2SeO_3 4.5 g, $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1.7 g.

Note: 1. Gelatin, fish meal, soybean oil, rapeseed oil, fish oil, soybean phospholipid powder, cholesterol, bentonite, vitamin E, calcium dihydrogen phosphate were obtained from Wuxi Tongwei feedstuffs Co., Ltd, Wuxi, China; 2. Casein was obtained from Hulun Buin Sanyuan Milk Co., Ltd., Inner Mongolia, China; 3. Ecdysone, DMPT, choline chloride, vitamin premix, mineral premix were obtained from Jiangsu Fuyuda Grain Products Co., Ltd., Yangzhou, China; 4. Vitamin premix supplied the following vitamins: VA 1.5 g, VB₁ 1.3 g, VB₂ 2.0 g, VB₆ 2.4 g, VB₁₂ 0.8 g, VC 40.0 g, VD₃ 0.5 g, VK₃ 3.5 g, nicotinic acid 3.6 g, folic acid 0.4 g, *D*-biotin 0.8 g, inositol 12.5 g; 5. Mineral premix supplied the following minerals: zeolite powder 352.8 g, rice chaff powder 267.4 g, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 10 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 150 g, $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 66.7 g, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 34.8 g, KCl 23.6 g, $\text{MnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 9.4 g, $\text{CaH}_4\text{I}_2\text{O}_6$ 6.5 g, Na_2SeO_3 4.5 g, $\text{CoSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 1.7 g.

的幼虾 900 尾 (0.24±0.001) g 随机分于 18 个水泥池, 每个水泥池 50 尾。将 6 组实验饲料随机投喂于 18 个水泥池, 每种饲料投喂 3 个水泥池。实验期间每天投喂 3 次(7:30, 12:30, 17:30), 定点定量投喂, 日投喂量为虾重的 6%~8%, 每次投喂 1 h 后将残饵捞出, 烘干称重用于计算摄食量。每两天吸污一次, 每周换水 1/3, 全程保持水温 24~30 ℃, pH 7.2~8.5, 溶解氧 7.5~9.5 mg/L, 亚硝酸盐含量

低于 0.01 mg/L, 氨氮低于 0.05 mg/L, 硫化物低于 0.1 mg/L。养殖周期为 8 周。

1.3 样品采集

养殖结束后, 将虾饥饿 24 h 以排空肠道内容物。每个水泥池清点虾的数量并称总重, 随后每个水泥池随机取 3 尾虾于冰水中短暂麻醉。从围心腔快速抽取血淋巴, 采血方法为将血淋巴与抗凝剂 1:1 混合(抗凝剂配方: 柠檬酸钠 13.2 g/L, 柠檬酸 4.8 g/L, 葡萄糖 14.7 g/L)。血淋巴于 4 ℃ 4000 g/min 离心 10 min 后取上清, 保存于-20 ℃ 备用。每个重复另取 6 尾虾肌肉保存于 4 ℃ 用于质构和感官评定。

1.4 氨氮应激

在应激实验之前进行预实验确定氨氮浓度, 选取规格一致的虾 150 尾, 随机分于 15 个 10 L 塑料桶内, 保持充足的溶氧, 桶内用氯化铵(分析纯)分别配制成浓度分别为 5 mg/L、10 mg/L、15 mg/L、20 mg/L、25 mg/L 的溶液, 每个浓度 3 个重复, 保持 pH 在 7 左右。分别于应激后 6 h、12 h、24 h、48 h、72 h、96 h 观察死亡数, 参照梁俊平等的方法^[25], 得出总氨氮 96 h 对罗氏沼虾半致死浓度为 16.7 mg/L。养殖实验结束后, 每个重复选取规格一致的 10 尾虾(9.15±0.02) g, 向 10 L 水体中加入氯化铵溶液, 控制总氨氮浓度达 16.7 mg/L。实验过程中保持充足溶氧, 维持水温在 24 ℃ 左右, pH 7.2~7.5。每隔 4 h 测氨氮浓度, 加入适量母液维持终浓度为 16.7 mg/L。每隔 2 h 观察记录实验虾死亡数和活力, 并于氨氮应激 96 h 后采集虾血淋巴。

1.5 指标测定

1.5.1 生长性能 每组虾生长与形体指标测定计算公式如下:

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

$$\text{增重率(weight gain rate, WG, \%)} = (W_2 - W_1)/W_1 \times 100$$

$$\text{特定生长率(specific growth rate, SGR, \%)} = (\ln W_2 - \ln W_1)/D \times 100$$

$$\text{饵料系数(feed conversion ratio, FCR)} = C_t/W_t$$

$$\text{肥满度(condition factor, CF, \%)} = W_2/L^3 \times 100$$

$$\text{含肉率(flesh rate, FR, \%)} = W_m/W_2 \times 100$$

式中, N_1 为虾初数量(尾), N_2 为虾末数量(尾), W_1

为虾初均重(g), W_2 为虾末均重(g), D 为饲养时间(d), C_t 为每个缸累计消耗饲料总重(g), W_t 为每个重复虾总增重(g), L 为虾均长(cm), W_m 为每只虾肌肉重(g)。

1.5.2 血清生理生化指标 血清谷丙转氨酶(ALT)和谷草转氨酶(AST)活性, 以及总蛋白(TP)、总胆固醇(TC)、甘油三酯(TG)和白蛋白(ALB)含量采用全自动生化分析仪检测(BS-400, 深圳迈瑞生物医疗电子股份有限公司), 试剂盒购自上海执诚生物科技有限公司。其中, 测定 ALT、AST 采用 Tris 缓冲液不含 P5P 法; 测定 TP 采用双缩脲反应终点法; 测定 ALB 采用溴甲酚紫法; 测定 TG 采用 GPO-PAP 法; 测定 TC 采用过氧化酶法。

1.5.3 抗氧化指标 血淋巴中总抗氧化能力(T-AOC)、谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)活性、丙二醛(MDA)含量和超氧化物歧化酶(SOD)活性采用南京建成生物工程研究所试剂盒测定, 具体测定方法参见试剂盒自带的说明书(A015-1、A005-1、A003-1、A001-3)。

1.5.4 概略养分分析 饲料的概略养分分析方法如下: (1)将饲料称重并于 105 ℃ 烘干至恒重后, 冷却称重, 计算水分含量; (2)用凯氏定氮法测定粗蛋白含量, 取 0.2~0.3 g 样品于浓硫酸中消化后置于全自动凯氏定氮仪上测定粗蛋白含量; (3)用索氏抽提法测定粗脂肪含量, 取 3 g 左右样品称重后包于脂肪包, 在 105 ℃ 烘至恒重, 冷却称重后置于索氏抽提瓶中加无水乙醚浸泡 12 h, 再循环回流 12 h 后取出烘至绝干, 最后称重计算; (4)粗灰分采用马弗炉 550 ℃ 高温煅烧 6 h 后计算所得。

1.5.5 肌肉品质分析 肌肉感官评价: 每组取 9 尾虾烧开水蒸煮, 随机给 9 名实验员品尝, 从色、香、味上对虾肉进行感官评价, 评价指标包括气味强度(odor)、白度(whiteness)、亮度(brightness)、色彩强度(colorfulness)、滋味强度(taste)、鲜度(freshness)、嫩度(tenderness)、多汁性(juiciness)和鱼腥味(fishlike smell)。评价时, 虾肉置于自封袋中, 在水浴锅中 100 ℃ 隔水加热 5 min 后品尝。评估人员在品尝不同虾后用清水漱口, 并针对以上指标进行打分, 评分区间 1~5 分, 数值越高代表强度越大。

肌肉质构指标测定: 参照 Cai 等^[26]和 Hixson 等^[27]的方法在南京农业大学国家肉品质量安全控制工程中心采用质构剖面分析法(texture profile analysis, TPA)测定。每组虾取 9 尾虾肌肉, 测定指标包括硬度(hardness)、黏性(adhesiveness)、弹性(springiness)、内聚性(cohesiveness)、胶黏性(gumminess)、耐咀嚼性(chewiness)和回复性(resilience)。

肌肉蒸煮损失测定(cooking loss, CL,%): 每组取 3 尾虾, 剥离肌肉并吸干表面水分, 称量后(W_1)置于自封袋隔水加热 15 min, 温度恒温保持在 70 ℃, 取出吸干表面水分且称重(W_2), $CL=(W_1-W_2)/W_1\times 100$ 。肌肉滴水损失测定(drip loss, DL,%): 每组取 3 尾虾, 剥离肌肉并吸干表面水分, 称量后(W_1)后置于底部垫有吸水纸的离心管中, 在低温离心机下离心, 5000 r/min, 离心 20 min, 保持 4 ℃恒温。取出吸干水分, 称重(W_2), 得 $DL=(W_1-W_2)/W_1\times 100$ 。

1.6 数据分析

数据用 IBM SPSS (Statistical Package for Social Sciences 20.0)软件进行统计分析。实验数据先用 Levene test 进行方差齐次性检验, 若差异显著($P<0.05$)则用 Duncan's 多重比较检验进行均值比较。其中, 同种脂肪源添加不同水平 VE 以及投喂相同日粮应激前后采用独立 T 检验进行显著性比较; 相同 VE 水平投喂不同脂肪源以及相同应激

状态下投喂不同日粮采用单因素方差分析(one-way ANOVA)进行显著性比较; 不同因素之间的交互作用采用双因素方差分析(two-way ANOVA)进行比较。所有的结果均以平均值 $\pm$ 标准误($\bar{x}\pm SE$)来表示。

2 实验结果

2.1 生长性能

如表 2 所示, 日粮 VE 水平及 VE 与脂肪源交互作用对罗氏沼虾存活率、生长性能、饵料系数以及形体指标无显著影响($P>0.05$)。日粮脂肪源显著影响罗氏沼虾存活率($P<0.05$)、增重率($P<0.01$)、特定生长率($P<0.01$)和饵料系数($P<0.05$), 而对肥满度和含肉率等形体指标无显著影响($P>0.05$)。其中, 相比于植物油组, 鱼油组存活率、增重率和特定生长率显著降低, 饵料系数显著升高($P<0.05$)。

2.2 抗氧化指标

血淋巴抗氧化相关指标如图 1 所示, 脂肪源和 VE 水平对血淋巴 T-AOC、GPX、SOD 活性以及 MDA 含量影响显著($P<0.05$), 但二者无显著交互作用($P>0.05$)。在相同 VE 水平下, FO 组 T-AOC 和 SOD 活性均显著低于 SO 和 RO 组, GPX 活性均显著高于 SO 和 RO 组($P<0.05$), SO 组 MDA 水平均显著低于 FO 和 RO 组($P<0.05$)。对于相同脂

表 2 不同脂肪源日粮补充 VE 对罗氏沼虾生长和饲料利用的影响
Tab. 2 Effect of different dietary lipid source with VE supplementation on growth performance and feed utilization of *Macrobrachium rosenbergii*

	初重 IBW/g	末重 FBW/g	存活率 SR/%	增重率 WGR/%	特定生长率 SGR/(%/d)	饵料系数 FCR	肥满度 CF/%	含肉率 FR/%
200SO	0.25 $\pm$ 0.01	12.39 $\pm$ 0.20 ^a	88.00 $\pm$ 6.93 ^{ab}	4963.03 $\pm$ 61.58 ^a	6.33 $\pm$ 0.02 ^a	1.47 $\pm$ 0.12 ^c	2.36 $\pm$ 0.03	34.83 $\pm$ 1.26
600SO	0.24 $\pm$ 0.01	10.70 $\pm$ 0.36 ^{ab}	92.00 $\pm$ 4.00 ^a	4326.48 $\pm$ 187.51 ^{ab}	6.11 $\pm$ 0.069 ^{ab}	1.61 $\pm$ 0.79 ^{bc}	2.31 $\pm$ 0.07	39.83 $\pm$ 3.68
200RO	0.24 $\pm$ 0.01	11.85 $\pm$ 0.09 ^a	57.33 $\pm$ 16.01 ^c	4772.49 $\pm$ 84.73 ^a	6.27 $\pm$ 0.028 ^a	2.76 $\pm$ 0.70 ^{ab}	2.29 $\pm$ 0.26	30.09 $\pm$ 3.10
600RO	0.24 $\pm$ 0.01	11.44 $\pm$ 0.23 ^a	86.00 $\pm$ 2.00 ^{abc}	4638.43 $\pm$ 78.46 ^a	6.22 $\pm$ 0.027 ^{ab}	1.63 $\pm$ 0.31 ^{bc}	2.29 $\pm$ 0.36	31.29 $\pm$ 5.33
200FO	0.24 $\pm$ 0.01	8.60 $\pm$ 0.0.85 ^c	60.00 $\pm$ 10.26 ^{bc}	3445.75 $\pm$ 363.59 ^c	5.74 $\pm$ 0.174 ^c	2.97 $\pm$ 0.54 ^a	2.29 $\pm$ 0.44	34.69 $\pm$ 1.93
600FO	0.25 $\pm$ 0.01	9.74 $\pm$ 0.84 ^{bc}	64.67 $\pm$ 6.36 ^{abc}	3846.37 $\pm$ 336.90 ^{bc}	5.92 $\pm$ 0.14 ^{bc}	2.54 $\pm$ 0.23 ^{abc}	2.36 $\pm$ 0.12	32.18 $\pm$ 0.70
双因素方差分析(two-way ANOVA)								
VE	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
脂肪源	ns	**	*	**	**	*	ns	ns
交互	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注: 同一列中不同字母表示差异显著($P<0.05$); ns: $P>0.05$, *: $P<0.05$, **: $P<0.01$ 。
Note: The data in the same column with different superscripts are significantly different ($P<0.05$); ns: $P>0.05$, *: $P<0.05$, **: $P<0.01$.

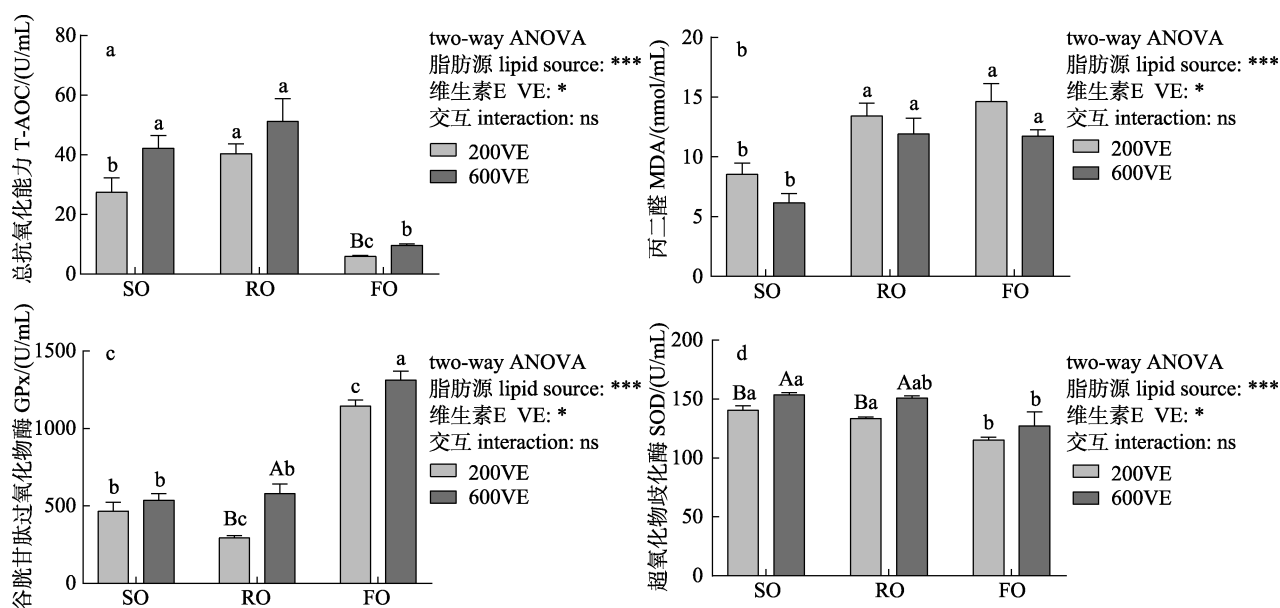


图 1 不同脂肪源日粮补充 VE 对罗氏沼虾血淋巴抗氧化指标的影响

相同 VE 水平包含不同小写字母以及相同脂肪源包含不同大写字母表示差异显著 ($P < 0.05$, $n = 9$, $\bar{x} \pm SE$); *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

Fig. 1 Effect of different dietary lipid sources with VE supplementation on antioxidant parameters of lymph in *Macrobrachium rosenbergii*

Means with different lowercases in the same dietary VE level and means with different capital letters in the same dietary lipid source are significantly different from each other ($P < 0.05$, $n = 9$, $\bar{x} \pm SE$); *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

肪源, 高水平 VE 可显著提高 FO 组 T-AOC 活性, RO 组 GPx 活性以及 SO 和 RO 组 SOD 活性 ($P < 0.05$), 而 VE 水平对 MDA 含量无显著影响 ($P > 0.05$).

2.3 血清生化指标

氮氮应激前后血淋巴生化指标如图 2 所示, AST、TP、ALB 和 TC 受日粮影响显著 ($P < 0.05$); AST 和 ALB 受氮氮应激影响显著 ($P < 0.05$); ALT、AST、TP、ALB 和 TC 受日粮和氮氮应激交互作用影响显著 ($P < 0.05$). 氮氮应激后 200RO 和 600FO 组 ALT 活性, 200FO 和 600FO 组 AST 活性, 600FO 组胆固醇含量均显著下降 ($P < 0.05$); 氮氮应激对各组 TP 和 TC 含量均无显著影响 ($P > 0.05$).

2.4 肌肉品质分析

罗氏沼虾肌肉感官评价如图 3 所示, 罗氏沼虾摄食不同脂肪源和 VE 水平对肌肉的气味强度、白度、亮度、色彩强度、滋味强度、鲜度、多汁性、鱼腥味和嫩度等指标均有不同程度的影响 (图 3a)。其中, 摄食不同脂肪源对肌肉的亮度、滋味强度、鲜度、鱼腥味和气味强度影响较为显著, 豆油组肌肉鲜度和滋味强度较高; 菜籽油组鱼腥味较低; 鱼油组肌肉亮度较高, 气味强度较低 (图 3b)。摄食不同 VE 水平对肌肉嫩度和多汁性

有显著影响, 高 VE 水平可明显提高肌肉嫩度和多汁性 (图 3c)。

罗氏沼虾肌肉质构如图 4 所示, 其中, 回复性、胶黏性、耐咀嚼性和内聚性受脂肪源、VE 水平及其交互影响均显著 ($P < 0.05$); 弹性受脂肪源、VE 水平及其交互影响均不显著 ($P > 0.05$); 硬度仅受脂肪源及交互作用影响 ($P < 0.05$); 黏性仅受交互作用影响 ($P < 0.05$)。对于 RO 组, 摄食 600 mg/kg VE 显著提高了肌肉硬度、回复性、胶黏性、弹性、耐咀嚼性和内聚性, 降低了黏性 ($P < 0.05$)。对于 200 mg/kg VE 组, FO 组肌肉硬度、回复性、胶黏性、耐咀嚼性显著高于植物油组 ($P < 0.05$); RO 组肌肉黏性显著高于 FO 和 SO 组 ($P < 0.05$)。对于 600 mg/kg VE 组, SO 组肌肉回复性、胶黏性、耐咀嚼性和内聚性显著低于 FO 和 RO 组 ($P < 0.05$); RO 组硬度显著高于 FO 和 SO 组 ($P < 0.05$)。

如图 5 所示, 日粮脂肪源、VE 水平及其交互作用对罗氏沼虾肌肉滴水损失均无显著影响 ($P > 0.05$) (图 5a)。脂肪源对罗氏沼虾肌肉蒸煮损失影响显著 ($P < 0.001$), 而 VE 水平及交互对其无显著影响 ($P > 0.05$)。在 600 mg/kg VE 下, RO 组蒸煮损失显著高于 FO 和 SO 组 ($P < 0.05$)。

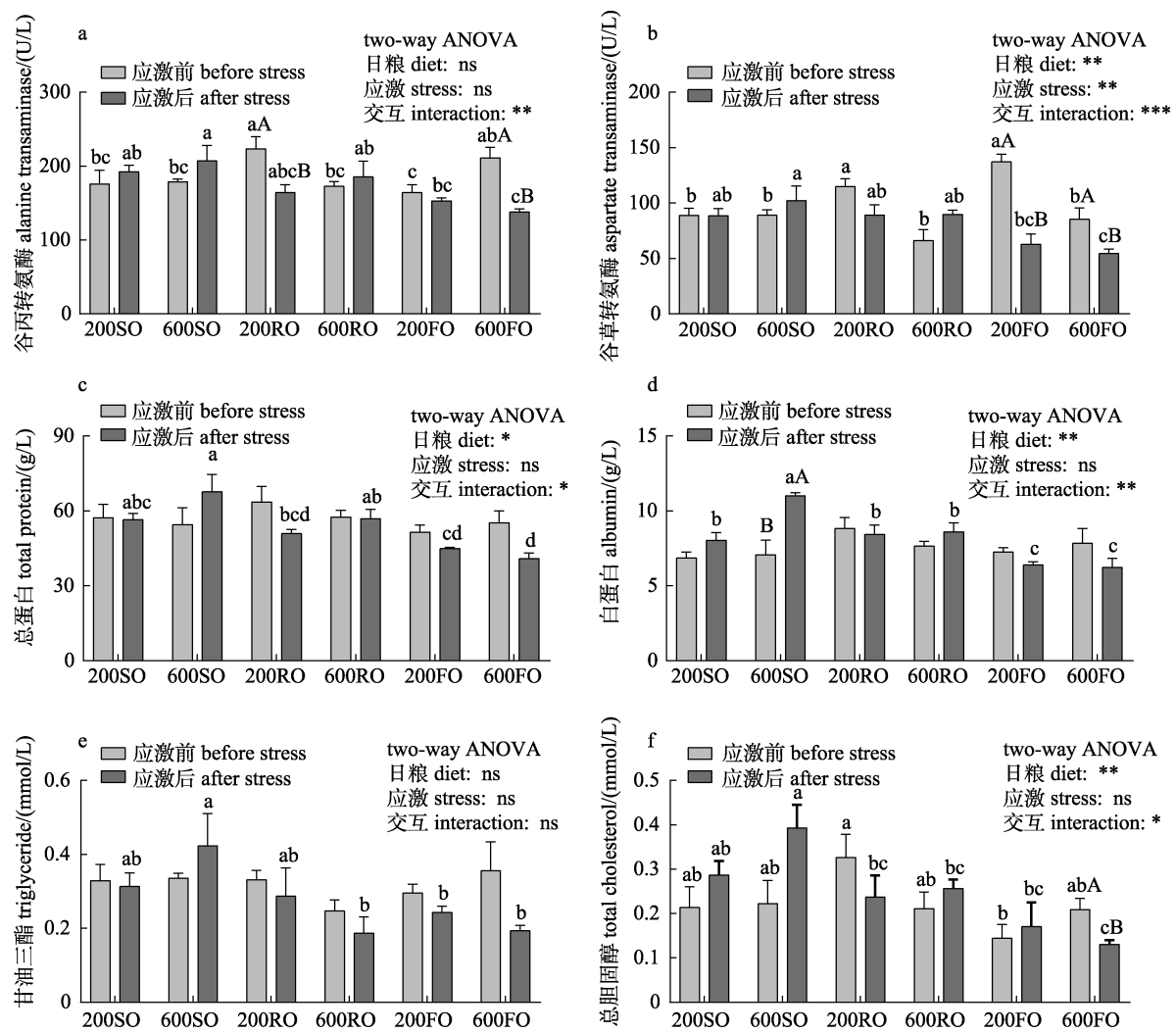


图 2 不同脂肪源日粮补充 VE 对罗氏沼虾血淋巴生化指标的影响。

相同应激状态包含不同小写字母以及相同日粮包含不同大写字母表示差异显著($P<0.05$, $n=9$, $\bar{x} \pm SE$); *: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$ 。

Fig. 2 Effect of different dietary lipid sources with VE supplementation on biochemical parameters of lymph in *Macrobrachium rosenbergii* Means with different lowercases in the same stress status and means with different majuscule in the same diet type are significantly different from each other ($P<0.05$, $n=9$, $\bar{x} \pm SE$); *: $P<0.05$; **: $P<0.01$; ***: $P<0.001$ 。

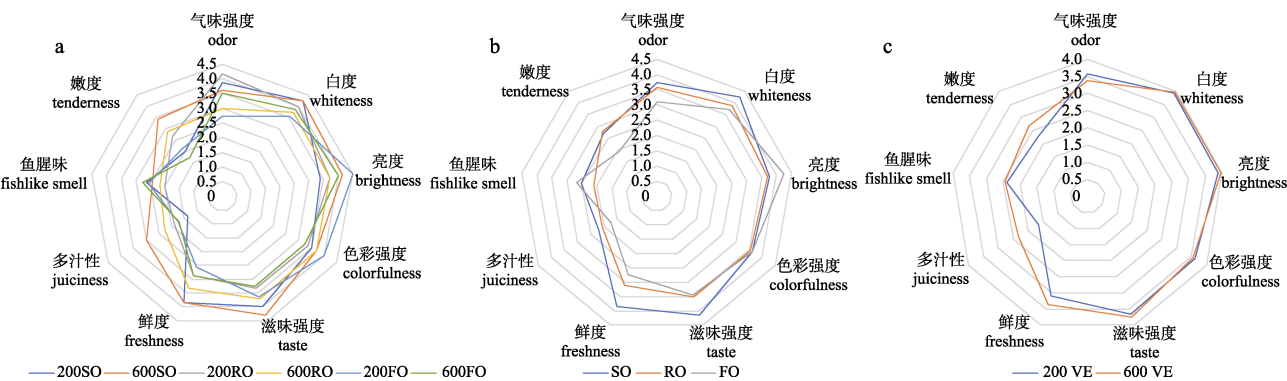


图 3 日粮中不同脂肪源补充 VE 对罗氏沼虾肌肉感官评价的影响($n=9$)

Fig. 3 Effect of different dietary lipid sources with VE supplementation on sensory evaluation of muscle in *Macrobrachium rosenbergii* ($n=9$)

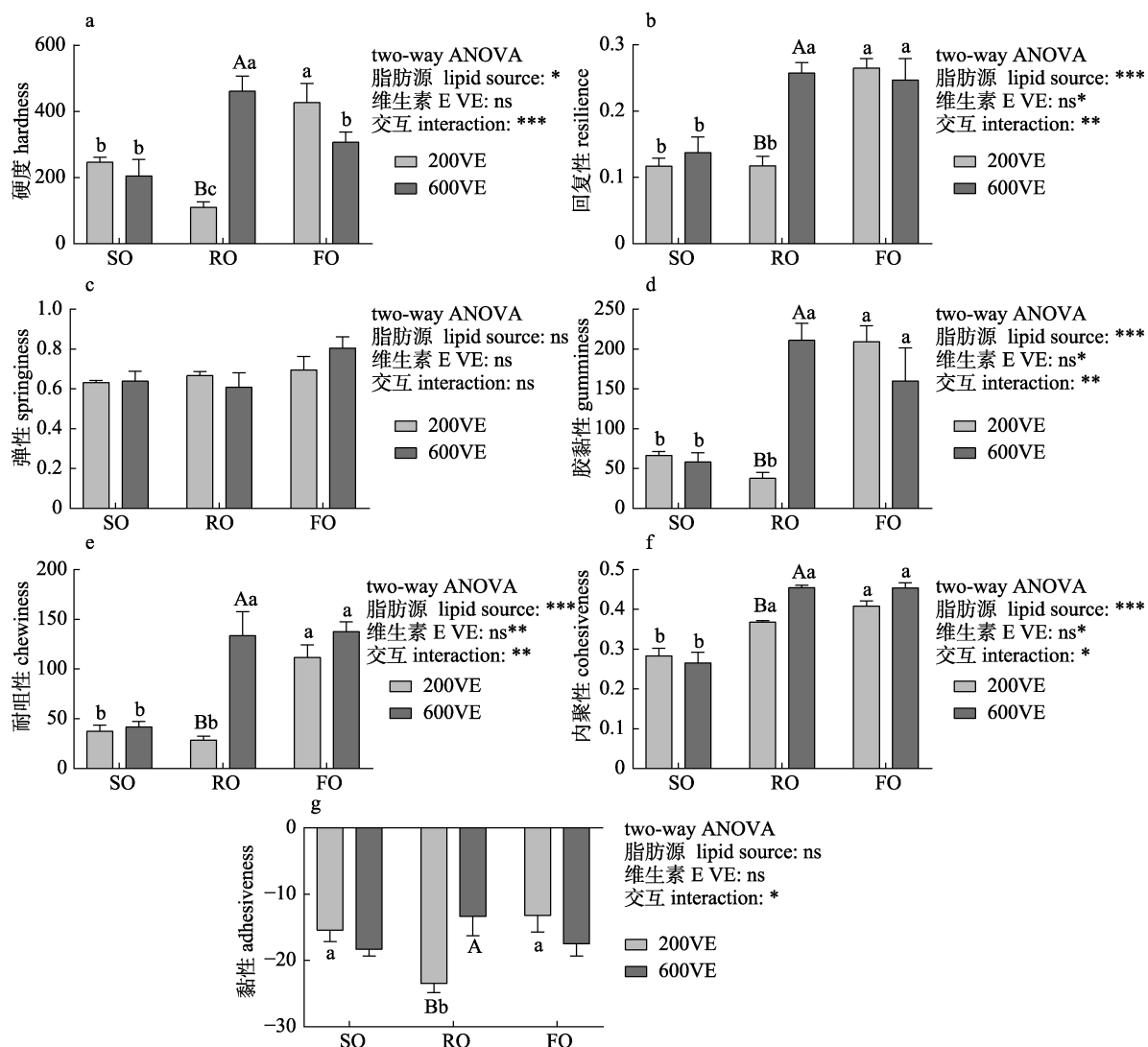


图 4 不同脂肪源日粮补充 VE 对罗氏沼虾肌肉质构的影响

相同 VE 水平包含不同小写字母以及相同脂肪源包含不同大写字母表示差异显著 ($P < 0.05$, $n=9$, $\bar{x} \pm SE$); *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

Fig. 4 Effect of different dietary lipid sources with VE supplementation on fillet texture profiles of muscle in *Macrobrachium rosenbergii*. Means with different lowercases in the same dietary VE level and means with different capital letters in the same dietary lipid source are significantly different from each other ($P < 0.05$, $n=9$, $\bar{x} \pm SE$); *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

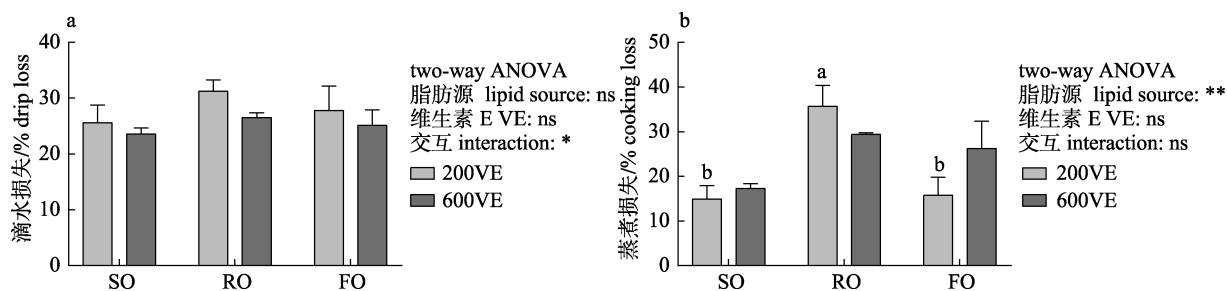


图 5 不同脂肪源日粮补充 VE 对罗氏沼虾肌肉滴水损失和蒸煮损失的影响

相同 VE 水平包含不同小写字母以及相同脂肪源包含不同大写字母表示差异显著 ($P < 0.05$, $n=9$, $\bar{x} \pm SE$); *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

Fig. 5 Effect of different dietary lipid sources with VE supplementation on drip loss and cooking loss of muscle in *Macrobrachium rosenbergii*. Means with different lowercases in the same dietary VE level and means with different capital letters in the same dietary lipid source are significantly different from each other ($P < 0.05$, $n=9$, $\bar{x} \pm SE$); *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

3 讨论

3.1 不同脂肪源日粮补充 VE 对罗氏沼虾生长性能和形体指标的影响

在本研究中日粮 VE 水平对罗氏沼虾生长性能、饲料利用和形体指标无显著作用。在日本沼虾^[28]、南美白对虾(*Litopenaeus vannamei*)^[29]和斑节对虾(*Penaeus monodon*)^[30]等的研究中发现, 饲料中添加适量的 VE 具有显著的促生长效果, 而日粮中添加高剂量的 VE 时实验对象的生长性能未成增加趋势。本课题组的前期研究表明, 罗氏沼虾 VE 的最适需求量为 169.38~218.66 mg/kg^[13]。因此, 在本研究中 200 mg/kg VE 添加量为罗氏沼虾的最适需求量, 过量(600 mg/kg)添加对生长无促进作用, 这与之前的研究结果相一致。本研究中日粮脂肪源对罗氏沼虾存活率、增重率、特定生长率和饵料系数有显著影响, 对形体指标影响不显著。其中, 植物油组的存活率、生长性能和饲料利用要显著优于鱼油组, 这与国内外的相关研究结果相似^[23-24]。其原因可能有以下两点: (1) 罗氏沼虾可高效利用植物油中的单不饱和脂肪酸。研究表明, 罗氏沼虾可高效利用 18:1n-9 和 18:2n-6 等十八碳脂肪酸, 并能将一些脂肪酸进行去饱和及延长, 如将 18:2n-6、20:3n-6 和 18:3n-3 转化为 20:2n-6 和 22:6n-3^[31-32]。虽然罗氏沼虾无法合成 20:4n-6 和 20:5n-3, 但其对长链高不饱和脂肪酸(long chain poly-unsaturated fatty acids, LC-PUFA)的需求较小, 一般商品日粮可以满足需求^[33]。因此, 富含 18:2n-6 和 18:1n-9 的豆油和菜籽油可作为罗氏沼虾的优质脂肪源。(2) 鱼油中的 LC-PUFA 超出罗氏沼虾的需求量, 导致脂质过氧化, 进而造成机体氧化应激。根据 NRC (2011), 罗氏沼虾对 LC-PUFA 的需求量为 0.075% (22:6n-3) 和 0.08% (20:4n-6), 而实验日粮中 22% 的鱼粉完全可满足罗氏沼虾对 LC-PUFA 的需求^[33]。在鱼类的研究中已经发现, 摄食过量的 LC-PUFA 可造成生长抑制、死亡率升高、脂质过氧化、肝脏病变等多种问题^[34-36]。因此, 鱼油组的生长下降可能是日粮中过量的 LC-PUFA 对机体造成的氧化损伤导致的。

3.2 不同脂肪源日粮补充 VE 对罗氏沼虾免疫和抗应激的影响

进一步测定血淋巴抗氧化指标发现, 日粮脂肪源显著影响 T-AOC、SOD 和 GPx 活性。其中, 机体 T-AOC 包含酶促和非酶促两个防御体系, T-AOC 的强弱可反映机体整体的防御机能; GPx 可清除体内自由基, 防止脂质过氧化; SOD 是机体酶保护系统中的重要抗氧化酶, 可清除自由基, 促进受伤组织修复^[37]。本研究中鱼油组 T-AOC 和 SOD 活性显著低于植物油组, 说明罗氏沼虾摄食鱼油后机体抗氧化能力可能降低, 这可能与过量高不饱和脂肪酸会提高细胞膜脂质过氧化的敏感性和破坏机体抗氧化系统有关^[38]。然而, 鱼油组 GPx 活性显著高于植物油组。GPx 活性与脂质过氧化水平相关, 在背角无齿蚌的研究中发现, 慢性镉暴露诱导的脂质过氧化可显著提高血清 GPx 活性^[39]; 在小鼠上也发现, 甲减诱导的脂质过氧化可导致 GPx 活性代偿性升高^[40]。因此, 本研究中鱼油组的高 GPx 活性很有可能与其高脂质过氧化水平有关, 具体机制还待后续研究。对于日粮不同 VE 水平, 高水平 VE 显著提高了鱼油组 T-AOC 活性, 以及植物油组 GPx 和 SOD 活性。这与 VE 作为饲料添加剂在虾中相关研究结果相似^[41-42]。因此, VE 对脂肪源诱导的氧化应激具有一定的保护作用。

为了解脂肪源和 VE 对罗氏沼虾抗应激能力的影响, 对各组罗氏沼虾进行氨氮应激实验发现, 氨氮应激仅显著影响血淋巴 AST 活性, 应激后鱼油组 AST 活性显著下降, AST 和 ALT 主要存在于肝脏细胞内, 当细胞破损时被释放到血液使血液中 AST 和 ALT 活性升高, 因此, 血液中这两种酶的活性是反映肝脏健康的重要指标。在团头鲂(*Megalobrama amblycephala*)的研究中发现, 高温应激和氨氮应激均会导致血清 AST 活性下降, 且饲料中添加免疫增强剂对 AST 活性无影响^[43], 其原因可能是短期应激导致机体免疫系统激活、代谢增强, 其具体机制还有待后续研究。本研究中日粮类型对血淋巴 AST 活性以及 TP、ALB 和 TC 含量影响显著。在应激前, 日粮中 VE 可降低 RO 和 FO 组 AST 活性, 说明 VE 对罗氏沼虾可能具

有缓解脂肪源诱导的肝损伤, 保护肝脏健康的作用^[44]。此外, 应激前各组 ALB 和 TG 含量差异不显著, 而应激后鱼油组 ALB、TC 和 TG 含量低于植物油组。研究显示, ALB 蛋白浓度能准确反应机体蛋白质的吸收和代谢, TC 含量反应机体的胆固醇代谢情况^[45-46], TG 含量能准确反映机体储存脂肪的能力^[47]。因此, 以上结果表明, 在应激条件下鱼油组相对于植物油组可能对蛋白和脂肪的吸收利用率更低, 这也能作为罗氏沼虾摄食鱼油生长性能和饲料利用率更低的部分解释。

3.3 不同脂肪源日粮补充 VE 对罗氏沼虾肌肉品质的影响

肌肉质构指与肌肉组织结构及状态相关的物理性质, 反映了肌肉的组织状态、口感及滋味感觉。无论对于加工还是消费者满意度来讲, 肌肉质构都是不可忽视的考察指标^[26]。本研究发现, 日粮脂肪源和 VE 对罗氏沼虾肌肉感官指标和质构均有影响。其中, 豆油组肌肉鲜度和滋味强度较高; 菜籽油组鱼腥味较低; 鱼油组肌肉亮度较高, 气味强度较低; 在 200 mg/kg VE 水平下, 鱼油组肌肉硬度、胶黏性、耐咀嚼性、黏性和回复性显著高于植物油组。在草鱼(*Ctenopharyngodon idella*)和大西洋鲑(*Salmo salar*)的研究中发现, 饲喂鱼油相比于饲喂豆油和菜籽油肌肉色泽更亮, 而植物油替代鱼油显著增加了肌肉的硬度、胶黏性、内聚性和耐咀嚼性^[48-49]; 在肉鸡中的研究发现, 在日粮中加入鱼油后肉鸡肌肉肉色降低, 滴水损失增加, 香味评分提高^[50], 用豆油替代日粮中鱼油, 肌肉的剪切力显著降低, 说明肌肉的嫩度显著增加^[51]。不同的研究结果可能是由于不同物种、饲料营养水平、养殖方式下肌肉和风味物质的沉积方式和效率不同。此外, 嫩度和多汁性作为肉品质的重要指标, 主要由肌肉中肌原纤维、结缔组织、胞浆和水分的含量决定。在本研究中 VE 可提高肌肉嫩度和多汁性, 这与在畜禽上的结果相似^[52-54], 其原因可能是 VE 可防止肌肉组织的钙激活酶被氧化, 进而加速肌原纤维蛋白降解, 最终提高了肌肉嫩度^[55]。本研究中 600 mg/kg VE 还显著提高了菜籽油组硬度、胶黏性、耐咀嚼性、黏性、回复性和内聚性。相似的结果在虹鳟

(*Oncorhynchus mykiss*)^[56]、尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)^[57]均有发现, 且相关研究表明, 保持最佳肉质的日粮 VE 水平要高于以生长性能拟合的 VE 最适需求量^[13, 57-58]。滴水损失和蒸煮损失反映肉的保水能力。在本研究中, 日粮脂肪源对肌肉滴水损失无影响, 而对蒸煮损失有显著影响, 其中, 在 200 mg/kg 日粮 VE 水平下, 菜籽油组的肌肉蒸煮损失显著高于其余组。对畜禽的研究指出, 日粮脂肪源诱导的滴水损失和蒸煮损失升高主要原因是脂肪过氧化破坏了细胞膜, 导致细胞保水性下降^[51]。本研究结果与畜禽上的结果相矛盾可能是由于不同物种间的脂肪代谢差异造成的。VE 对肌肉滴水损失和蒸煮损失均无显著影响。大多研究表明 VE 具有提高肌肉抗氧化稳定性, 降低滴水损失和蒸煮损失的效果^[55, 59], 其原因主要为 VE 作为一种脂溶性断链抗氧化剂, 能保护生物膜磷脂中的 PUFA 被自由基氧化, 维持细胞膜的完整和稳定, 从而保证肉品质的稳定, 减少滴水损失和蒸煮损失^[55, 60]。而相关研究主要集中在畜禽肉类上, 与虾肉相差较大, 相关研究在虾上仍需进一步验证。

4 结论

综上所述, 相比鱼油, 日粮中豆油和菜籽油等植物油对罗氏沼虾有更好的促生长效果, 其原因可能是罗氏沼虾摄食过量鱼油中的长链高不饱和脂肪酸导致脂质过氧化, 产生氧化应激。而日粮中添加 600 mg/kg VE 对鱼油组的生长、抗氧化和抗应激水平有一定促进作用。此外, 日粮脂肪源对肌肉的感官评价和质构均有显著影响。

参考文献:

- [1] Tocher D R. Fatty acid requirements in ontogeny of marine and freshwater fish[J]. Aquaculture Research, 2010, 41(5): 717-732.
- [2] Du Z Y, Clouet P, Huang L M, et al. Utilization of different dietary lipid sources at high level in herbivorous grass carp (*Ctenopharyngodon idella*): Mechanism related to hepatic fatty acid oxidation[J]. Aquaculture Nutrition, 2008, 14(1): 77-92.
- [3] Sies H. Oxidative stress: Oxidants and antioxidants[J]. Experimental Physiology, 1997, 82(2): 291-295.

- [4] Furukawa S, Fujita T, Shimabukuro M, et al. Increased oxidative stress in obesity and its impact on metabolic syndrome[J]. *Journal of Clinical Investigation*, 2004, 114(12): 1752-1761.
- [5] Yan Y N, Xia S L, Tian H Y, et al. Effects of resveratrol supplementation on growth performance, immunity, antioxidant capability and disease resistance of blunt snout bream fed high-fat diet[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, 41(1): 155-164. [闫亚楠, 夏斯蕾, 田红艳, 等. 白藜芦醇对高脂胁迫团头鲂抗氧化能力、非特异免疫机能和抗病力的影响[J]. *水生生物学报*, 2017, 41(1): 155-164.]
- [6] Lu K L, Xu W N, Liu W B, et al. Association of mitochondrial dysfunction with oxidative stress and immune suppression in Blunt Snout Bream *Megalobrama amblycephala* fed a high-fat diet[J]. *Journal of Aquatic Animal Health*, 2014, 26(2): 100-112.
- [7] Drobná Z, Zelenka J, Mrkvicová E, et al. Influence of dietary linseed and sunflower oil on sensory characteristics of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*)[J]. *Czech Journal of Animal Science*, 2011, 51(11): 475-482.
- [8] Regost C, Arzel J, Robin J, et al. Total replacement of fish oil by soybean or linseed oil with a return to fish oil in turbot (*Psetta maxima*): 1. Growth performance, flesh fatty acid profile, and lipid metabolism[J]. *Aquaculture*, 2003, 217(1-4): 465-482.
- [9] Mørkøre T, Netteberg C, Johnsson L, et al. Impact of dietary oil source on product quality of farmed Atlantic cod, *Gadus morhua*[J]. *Aquaculture*, 2007, 267(1-4): 236-247.
- [10] Izquierdo M S, Montero D, Robaina L, et al. Alterations in fillet fatty acid profile and flesh quality in gilthead seabream (*Sparus aurata*) fed vegetable oils for a long term period. Recovery of fatty acid profiles by fish oil feeding[J]. *Aquaculture*, 2005, 250(1-2): 431-444.
- [11] Turchini G M, Moretti V M, Mentasti T, et al. Effects of dietary lipid source on fillet chemical composition, flavour volatile compounds and sensory characteristics in the freshwater fish tench (*Tinca tinca* L.)[J]. *Food Chemistry*, 2007, 102(4): 1144-1155.
- [12] Li Y M, Fan B, Huang Y H, et al. Effects of dietary vitamin E on reproductive performance and antioxidant capacity of *Macrobrachium nipponense* female shrimp[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2018, 24(6): 1698-1708.
- [13] 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.]
- [14] Griboff J, Morales D, Bertrand L, et al. Oxidative stress response induced by atrazine in *Palaemonetes argentinus*: The protective effect of vitamin E[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 108: 1-8.
- [15] Mourente G, Diaz-Salvago E, Bell J G, et al. Increased activities of hepatic antioxidant defence enzymes in juvenile gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.) fed dietary oxidised oil: Attenuation by dietary vitamin E[J]. *Aquaculture*, 2002, 214(1-4): 343-361.
- [16] Jia Y D, Jing Q Q, Niu H X, et al. Ameliorative effect of vitamin E on hepatic oxidative stress and hyp immunity induced by high-fat diet in turbot (*Scophthalmus maximus*)[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2017, 67: 634-642.
- [17] Guo H J. The research progress of the function of vitamin-E[J]. *Journal of Tianshui Normal University*, 2005, 25(5): 44-46. [郭红菊. 维生素 E 功能的研究进展[J]. *天水师范学院学报*, 2005, 25(5): 44-46.]
- [18] Wu F, Wen H, Jiang M, et al. Effect of dietary vitamin C on growth performance, flesh quality and antioxidant function in genetically improved farmed tilapia[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2015, 22(1): 79-87. [吴凡, 文华, 蒋明, 等. 饲料维生素 C 水平对吉富罗非鱼生长性能、肌肉品质和抗氧化功能的影响[J]. *中国水产科学*, 2015, 22(1): 79-87.]
- [19] Lozano A R, Borges P, Robaina L, et al. Effect of different dietary vitamin E levels on growth, fish composition, fillet quality and liver histology of meagre (*Argyrosomus regius*)[J]. *Aquaculture*, 2017, 468: 175-183.
- [20] He M. Effects of vitamin E on growth performance, meat quality and immune responses in channel catfish, (*Ictalurus punctatus Rafinesque*)[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2009. [何敏. 维生素 E 对斑点叉尾鲷生长性能、免疫功能及肉质影响的机理研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2009.]
- [21] Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China Fisheries Statistics Yearbook 2019[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019: 5, 24. [农业农村部渔业渔政管理局, 全国水产技术推广总站, 中国水产学会. 2019 中国渔业统计年鉴[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019: 5, 24.]
- [22] Kamarudin M S, Roustaiian P. Growth and fatty acid composition of freshwater prawn, *Macrobrachium rosenbergii*, larvae fed diets containing various ratios of cod liver oil-corn oil mixture[J]. *Journal of Applied Ichthyology*, 2002, 18(3):

- 148-153.
- [23] Kim Y C, Romano N, Lee K S, et al. Effects of replacing dietary fish oil and squid liver oil with vegetable oils on the growth, tissue fatty acid profile and total carotenoids of the giant freshwater prawn, *Macrobrachium rosenbergii*[J]. Aquaculture Research, 2013, 44(11): 1731-1740.
- [24] Kangpanich C, Pratoomyot J, Senanan W. Effects of alternative oil sources in feed on growth and fatty acid composition of juvenile giant river prawn (*Macrobrachium rosenbergii*)[J]. Agriculture and Natural Resources, 2017, 51(2): 103-108.
- [25] Liang J P, Li J, Li J T, et al. Acute toxicity of ammonia nitrogen to juvenile and adult ridgetail white prawn, *Exopalaemon carinicauda*[J]. Fisheries Science, 2012, 31(9): 526-529. [梁俊平, 李健, 李吉涛, 等. 氨氮对脊尾白虾幼虾和成虾的毒性试验[J]. 水产科学, 2012, 31(9): 526-529.]
- [26] Cai W C, Jiang G Z, Li X F, et al. Effects of complete fish meal replacement by rice protein concentrate with or without lysine supplement on growth performance, muscle development and flesh quality of blunt snout bream (*Megalobrama amblycephala*)[J]. Aquaculture Nutrition, 2018, 24(1): 481-491.
- [27] Hixson S M, Parrish C C, Anderson D M. Full substitution of fish oil with *Camelina* (*Camelina sativa*) oil, with partial substitution of fish meal with *Camelina* meal, in diets for farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) and its effect on tissue lipids and sensory quality[J]. Food Chemistry, 2014, 157: 51-61.
- [28] Zhao W H, Wang Z S, Yu Y B, et al. Growth and antioxidant status of oriental river prawn *Macrobrachium nipponense* fed with diets containing vitamin E[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2016, 34(3): 477-483.
- [29] Zhou Q C, Wang Y L, Wang H L, et al. Dietary threonine requirements of juvenile Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*[J]. Aquaculture, 2013, 392-395: 142-147.
- [30] 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.
- [31] Querijero B V L, Teshima S, Koshio S, et al. Utilization of monounsaturated fatty acid (18:1n-9, oleic acid) by freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* (de Man) juveniles[J]. Aquaculture Nutrition, 1997, 3(2): 127-139.
- [32] Reigh R C, Stickney R R. Effects of purified dietary fatty acids on the fatty acid composition of freshwater shrimp, *Macrobrachium rosenbergii*[J]. Aquaculture, 1989, 77(2-3): 157-174.
- [33] National Research Council (NRC). Nutrient Requirements of Fish and Shrimp[M]. Washington, D.C.: The National Academies Press, 2011: 107-116.
- [34] Betancor M B, Atalah E, Caballero M, et al. α -Tocopherol in weaning diets for European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) improves survival and reduces tissue damage caused by excess dietary DHA contents[J]. Aquaculture Nutrition, 2011, 17(2): e112-e122.
- [35] Zhu H, He A, Chen L, et al. Effects of dietary lipid level and n-3/n-6 fatty acid ratio on growth, fatty acid composition and lipid peroxidation in Russian sturgeon *Acipenser gueldenstaedtii*[J]. Aquaculture Nutrition, 2017, 23(4): 879-890.
- [36] Du Z Y, Clouet P, Huang L M, et al. Utilization of different dietary lipid sources at high level in herbivorous grass carp (*Ctenopharyngodon idella*): Mechanism related to hepatic fatty acid oxidation[J]. Aquaculture Nutrition, 2008, 14(1): 77-92.
- [37] Chang J. Studies on sensitive immunology parameters screening and evaluation in white shrimp *Litopenaeus vannamei* and sea cucumber *Apostichopus japonicus* Selenka[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010. [常杰. 对虾和刺参敏感免疫学指标的筛选和评价[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.]
- [38] Song J H, Fujimoto K, Miyazawa T. Polyunsaturated (n-3) fatty acids susceptible to peroxidation are increased in plasma and tissue lipids of rats fed docosahexaenoic acid-containing oils[J]. The Journal of Nutrition, 2000, 130(12): 3028-3033.
- [39] Jia J B, Jing W X, Li Y Q, et al. Oxidative damage effect of chronic cadmium exposure on the liver of the freshwater mussel *Anodonta woodiana*[J]. Letters in Biotechnology, 2019, 30(2): 207-211. [贾嘉宝, 井维鑫, 李涌泉, 等. 慢性镉暴露对背角无齿蚌肝脏的氧化损伤效应[J]. 生物技术通讯, 2019, 30(2): 207-211.]
- [40] Liu T. Changes in lipid peroxidation and the gene expression level of GPx, SOD in kidney of hypothyroid rats[D]. Shijiazhuang: Hebei Medical University, 2007. [刘涛. 甲减大鼠肾脏脂质过氧化及 GPx、SOD 基因水平的实验研究[D]. 石家庄: 河北医科大学, 2007.]
- [41] Liu Q F, Cao J M, Huang Y H, et al. The combined effects of β -glucan with selenium and vitamin E on the growth performance, serum immune and antioxidant indexes, and disease resistance of *Litopenaeus vannamei*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2013, 20(5): 997-1006. [刘群芳, 曹俊明, 黄燕华, 等. β -葡聚糖与硒、维生素 E 联合添加对凡纳滨对虾生长、血清免疫和抗氧化指标及抗病力的影响[J]. 中国水产科学, 2013, 20(5): 997-1006.]
- [42] Liu Y, Wang W N, Wang A L, et al. Effects of dietary vitamin E supplementation on antioxidant enzyme activities in

- Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) exposed to acute salinity changes[J]. *Aquaculture*, 2007, 265(1-4): 351-358.
- [43] Cui S L. Effects of emodin on growth, blood physiology and resistance to ammonia nitrogen stress in wuchang bream (*Megalobrama amblycephala*) under high temperature[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012. [崔素丽. 高温下大黄素对团头鲂生长、血液指标及抗氨氮应激的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.]
- [44] Li J, Liang X F, Tan Q S, et al. Effects of vitamin E on growth performance and antioxidant status in juvenile grass carp *Ctenopharyngodon idellus*[J]. *Aquaculture*, 2014, 430: 21-27.
- [45] Zhang Y Y, Liu B, Ge X P, et al. Effect of dietary oil sources on growth performance, body composition, the serum biochemical indices, fatty acids composition and lipid metabolism of *Carassius auratus gibelio*[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, 36(7): 1111-1118. [张媛媛, 刘波, 戈贤平, 等. 不同脂肪源对异育银鲫生长性能、机体成分、血清生化指标、体组织脂肪酸组成及脂质代谢的影响[J]. *水产学报*, 2012, 36(7): 1111-1118.]
- [46] Li X F, Tian H Y, Zhang D D, et al. Feeding frequency affects stress, innate immunity and disease resistance of juvenile blunt snout bream *Megalobrama amblycephala*[J]. *Fish & Shellfish Immunology*, 2014, 38(1): 80-87.
- [47] Lu Y, Jin M, Yuan Y, et al. Effects of different lipid sources on growth performance, body composition, the serum biochemical indices, fatty acids composition and antioxidant capacity in juvenile yellow catfish (*Pelteobagrus fulvidraco*)[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2018, 42(7): 1094-1110. [陆游, 金敏, 袁野, 等. 不同脂肪源对黄颡鱼幼鱼生长性能、体成分、血清生化指标、体组织脂肪酸组成及抗氧化能力的影响[J]. *水产学报*, 2018, 42(7): 1094-1110.]
- [48] Regost C, Jakobsen J V, Rørå A M B. Flesh quality of raw and smoked fillets of Atlantic salmon as influenced by dietary oil sources and frozen storage[J]. *Food Research International*, 2004, 37(3): 259-271.
- [49] Chen Y F. Effect of different lipid source and level on the growth and lipid metabolism in juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*)[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017. [陈云飞. 饲料脂肪源和脂肪水平对草鱼幼鱼生长及脂肪代谢的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017.]
- [50] Han R L, Li T S, Li J Q, et al. Study on the effect on chicken meat quality of fish oil diet[J]. *China Poultry*, 2005, 27(19): 15-16, 20. [韩瑞丽, 李同树, 李建群, 等. 鱼油日粮对鸡肉品质的影响研究[J]. *中国家禽*, 2005, 27(19): 15-16, 20.]
- [51] Lou P. The effects of different oils on performance and meat quality of broilers[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2011. [娄鹏. 不同油脂类型对肉鸡生长性能和肌肉品质的影响[D]. 郑州: 河南工业大学, 2011.]
- [52] Wang X H, Liu F Z, Niu Z Y, et al. Influence of vitamin E on antioxidative activity and meat oxidation stability of broilers[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2011, 20(2): 1-7. [王显慧, 刘福柱, 牛竹叶, 等. V_E 对肉鸡抗氧化性能和肉品氧化稳定性的影响[J]. *西北农业学报*, 2011, 20(2): 1-7.]
- [53] Maiorano G, Tavaniello S. The modes of vitamin E administration and its role on meat quality: A mini-review[J]. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 2016, 5(special 1): 27-30.
- [54] Carnagey K M, Huff-Loneragan E J, Trenkle A, et al. Use of 25-hydroxyvitamin D3 and vitamin E to improve tenderness of beef from the longissimus dorsi of heifers[J]. *Journal of Animal Science*, 2008, 86(7): 1649-1657.
- [55] Rao S D. Effects of different vitamin premixes and stocking density on performance, health, and meat quality of broilers[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2015. [饶盛达. 不同维生素组合和饲养密度对肉鸡生产性能、健康和肉品质的影响研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015.]
- [56] Yildiz M. The study of fillet quality and the growth performance of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) fed with diets containing different amounts of vitamin E[J]. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2004, 4(2): 81-86.
- [57] Wu F, Jiang M, Wen H, et al. Dietary vitamin E effects on growth, fillet textural parameters, and antioxidant capacity of genetically improved farmed tilapia (GIFT), *Oreochromis niloticus*[J]. *Aquaculture International*, 2017, 25(2): 991-1003.
- [58] Gatta P, Pirini M, Testi S, et al. The influence of different levels of dietary vitamin E on sea bass *Dicentrarchus labrax* flesh quality[J]. *Aquaculture Nutrition*, 2000, 6(1): 47-52.
- [59] Monahan F, Gray J I, Asghar A, et al. Effect of dietary lipid and vitamin E supplementation on free radical production and lipid oxidation in porcine muscle microsomal fractions[J]. *Food Chemistry*, 1993, 46(1): 1-6.
- [60] Shi X H, Bian L Q, Wang N. Effects of vitamin E, chromium picolinate on meat quality of growth-finished pig[J]. *Journal of Animal Science and Veterinary Medicine*, 2005, 24(6): 1-4. [石新辉, 边连全, 王娜. 肥育后期添加维生素 E、吡啶羧酸铬对肥育猪肉品质的影响[J]. *畜牧兽医杂志*, 2005, 24(6): 1-4.]

Effect of various dietary lipid sources combined with vitamin E supplementation on growth performance, immunity, and flesh quality in *Macrobrachium rosenbergii*

SUN Cunxin¹, XIONG Zhe², ZHOU Qunlan^{1,2}, SONG Changyou¹, SHAN Fan², LIU Bo^{1,2}, XU Hongqin³

1. Key Laboratory of Freshwater Fisheries and Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Freshwater Fisheries Research Center, Chinese Academy of Fishery Sciences, Wuxi 214081, China;
2. Wuxi Fisheries College, Nanjing Agricultural University, Wuxi 214081, China;
3. Jiangsu Fuyuda Grain Products Co., Ltd., Gaoyou 225600, China

Abstract: The purpose of this study was to investigate the effect of various sources of dietary lipids with vitamin E (VE) supplementation as feed additives on growth, flesh quality, and immunity in *Macrobrachium rosenbergii*. A 3×2 factorial design with total 6 feed groups was implemented, comprising three different lipid sources [fish oil (FO), soybean oil (SO), and rapeseed oil (RO)] and two levels of dietary VE [200 mg/kg (200VE) and 600 mg/kg (600VE)]. The feeding trial was conducted in a cement pond inside a greenhouse. Prawns were fed thrice daily for 8 weeks. Results demonstrated that rate of weight gain and specific growth rate significantly increased in the SO and RO groups, compared to the FO group, while the feed coefficient significantly decreased ($P<0.05$). VE had no significant effect on growth performance and feed utilization. We measured antioxidant parameters in lymph. Among prawns receiving the same amount of VE, both total anti-oxidative capacity (T-AOC) and superoxide dismutase (SOD) activity were significantly lower, while glutathione peroxidase (GPx) activity was significantly higher ($P<0.05$) in the FO group than in the SO and RO groups. Malondialdehyde (MDA) content in the SO group was significantly lower ($P<0.05$) than in the FO and RO groups. Among prawns receiving the same lipid source, supplementation with 600VE was found to significantly increase T-AOC activity in the FO group, GPx activity in the RO group, and SOD activity in both SO and RO groups ($P<0.05$). Nevertheless, dietary VE level had no significant effect on MDA content of lymph. Physiological and biochemical indices of lymph, including aspartate aminotransferase (AST), total protein (TP), albumin (ALB) and triglycerides (TC) were significantly affected by diet type ($P<0.05$); AST and ALB were significantly affected by ammonia nitrogen stress ($P<0.05$). Further, dietary lipid sources and VE levels also had significant effects on flesh quality. Flesh was fresher and tasted better in the SO group; flesh in the RO group had less fishy odor, while flesh in the FO group had more color with less odor. At the 200 mg/kg VE level, flesh hardness, adhesiveness, cohesiveness, gumminess, chewiness, and resilience were significantly higher in the FO group compared to the SO and RO groups ($P<0.05$); flesh cooking loss in the RO group was significantly higher than that in the other groups ($P<0.05$). At the 600 mg/kg VE level, flesh tenderness and juiciness significantly increased, while there was no significant effect on flesh cooking loss and drip loss. Our results suggest that compared to fish oil, vegetable oils such as soybean oil and rapeseed oil are better sources of dietary lipids for *Macrobrachium rosenbergii*. VE has a growth promoting and stress alleviating effect when added to feeds with fish oil as a single lipid source. In addition, both lipid source and VE level significantly affect the flesh quality.

Key words: lipid source; vitamin E; growth performance; immunity; flesh quality; *Macrobrachium rosenbergii*

Corresponding author: LIU Bo. E-mail: liub@ffrc.cn