

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2017.16186

饲料中添加南极磷虾粉对凡纳滨对虾亲虾生长、性腺发育及脂肪酸积累的影响

张玉玲^{1,2}, 罗坤^{2,3}, 孔杰^{2,3}, 梁萌青^{2,3}, 栾生^{2,3}, 陈琼^{1,2}, 曹宝祥^{2,3}

1. 中国海洋大学 海洋生命学院, 山东 青岛 266003;

2. 中国水产科学研究院 黄海水产研究所 农业部海洋渔业资源可持续利用重点开放实验室, 山东 青岛 266071;

3. 青岛海洋科学与技术国家实验室 海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室, 山东 青岛 266071

摘要: 为探讨人工配合饲料中添加磷虾粉对凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*)亲虾性腺发育的影响, 分别在饲料中添加 0、10%、20% 的南极磷虾粉, 配制 3 组人工配合饲料(饲料组 1、饲料组 2 和饲料组 3)对 12 月龄的凡纳滨对虾进行了为期 60 d 的营养强化培养, 并以投喂双齿围沙蚕(*Perinereis aibuhitensis*)为对照组。营养强化结束之后, 比较分析了不同饲料组凡纳滨对虾亲虾的体重增重率、肝胰腺指数(HPI)和性腺指数(GSI); 另外, 检测分析了各组饲料以及亲虾性腺和肝胰腺的脂肪酸组成。结果表明, 对照组的雌雄亲虾体重增重率均高于 3 个饲料组; 饲料组 2 的 HPI 最低, 为(2.37±0.02)%, 与对照组无显著差异($P>0.05$); 饲料组 3 的 GSI 与对照组无显著差异($P>0.05$), 但两组的 GSI 均低于饲料组 2, 并且存在显著差异($P<0.05$)。同时, 本研究还比较分析了饲料脂肪酸组成与亲虾性腺、肝胰腺脂肪酸组成的相关性以及对亲虾性腺发育的影响。结果显示, 饲料中添加一定含量(10%~20%)的南极磷虾粉可在一定程度上成为凡纳滨对虾亲虾营养强化阶段的优良饲料。

关键词: 凡纳滨对虾亲虾; 性腺发育; 人工配合饲料; 南极磷虾粉

中图分类号: S96

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2017)02-0306-11

南极磷虾粉(Antarctic krill meal)因其较高的营养价值, 作为饲料原料的潜能逐步被开发^[1]。其中, 加工后的南极磷虾粉粗蛋白含量为 59.4%~62.3%^[2], 粗脂肪含量为 9.3%~15.1%^[3], 氨基酸组成合理^[4], 另外, 也含有丰富的多不饱和脂肪酸^[5]。楼乔明等^[6]研究南极磷虾粉体内脂肪酸组成发现其 Σ PUFA 含量占总脂肪酸含量的 47.98%, 其中, EPA 和 DHA 含量高达 21.42%和 19.22%; 并且, 不饱和脂肪酸中以 n-3 系列脂肪酸为主, 占 45.41%, n-6 系列脂肪酸的含量仅为 2.24%。

凡纳滨对虾(*Litopenaeus vannamei*), 俗称南美白对虾, 是开放式纳精囊虾种, 同时也是三大优良养殖虾种类之一^[7]。生产中, 为保证亲虾顺利

成熟和产卵, 会在摘除亲虾单侧眼柄前对亲虾进行为期两个多月的营养强化培养。营养强化阶段, 亲虾会从饵料中摄取并积累大量的营养物质, 具体体现在亲虾体长、体重的增长上, 同时也伴有较明显的蜕皮现象。Palacios 等^[8]的研究表明, 卵巢在性腺发育过程中会迅速增重, 几天内的增重量甚至能达到 4~9 倍。因此, 在亲虾性腺发育期间, 需提供合适的饵料, 保证亲虾繁殖所必需的物质和能量的充分积累。目前, 亲虾的繁殖培育一般投喂生物饵料, 包括鲜活沙蚕(Nereididae)以及冰冻的牡蛎(*Ostrea*)、鱿鱼(Loliginidae)等^[9], 这一过程一般从营养强化阶段持续到产卵阶段。这些生物饵料能够提高亲虾繁殖性能和幼体质量, 但在其应用过程中, 也存在越来越多的问题。

收稿日期: 2016-06-15; 修订日期: 2016-09-06.

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31572616); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目(20603022016006).

作者简介: 张玉玲(1992-), 女, 硕士研究生, 研究方向为水产动物营养及育种. E-mail: chenxiyuling@126.com

通信作者: 孔杰, 博士, 研究员. E-mail: kongjie@ysfri.ac.cn

杜少波等^[9]的研究证实,沙蚕、牡蛎等天然生物饵料携带对虾多种致病源,能通过垂直传播的途径影响亲虾的子代幼体。另外,这些生物饵料的生长和繁殖受诸多环境因素的影响,质量和产量不稳定,易影响大批量亲虾催熟培育及苗种生产^[9]。而且,生物饵料投喂量大(一般日投喂量为亲虾体重的 20%~30%),价格昂贵,制约着苗种生产企业经济效益的提高。相比之下,亲虾人工配合饲料具有安全、稳定、价格相对低廉等优点,随着中国对虾养殖业的不断发展,开发出优良的人工配合亲虾饲料,将产生重大的经济效益。

本实验依据前人对亲虾繁殖期间营养状况的研究情况,并结合天然饵料的营养组成,设计了 3 组磷虾粉含量不同的亲虾培育期间的人工配合饲料作为凡纳滨对虾亲虾营养强化期间的饵料。比较研究了它们与沙蚕脂肪酸组成的差异,以及对凡纳滨对虾亲虾营养强化期间体重增重率、肝胰腺指数和性腺指数的培育效果。本研究目的是能够筛选出在亲虾营养强化阶段有效促进性腺发育的优质人工配合饲料,同时能够为凡纳滨对虾亲虾繁殖阶段的营养研究提供有意义的参考依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 亲虾 实验所用的凡纳滨对虾亲虾来源于河北省黄骅市鑫海水产生物技术有限公司,12 月龄,前期无营养强化处理。雌虾体长(13.11±0.85) cm,体重(34.63±4.71) g,肝胰腺指数(3.24±0.49)%,无性腺发育情况;雄虾体长(12.08±0.74) cm,体重(29.83±4.14) g。

1.1.2 配合饲料 3 种亲虾人工配合饲料以鱼粉、磷虾粉为蛋白源,鱼油为脂肪源,南极磷虾粉含量为主要对照,按照等能量的原则适度调整其他成分的含量,如酪蛋白、虾糠粉、贻贝粉等。亲虾饲料配方组成及常规营养成分含量见表 1。饲料原料粉碎后过 60 目筛,采用逐级放大的方法混匀后加水搅拌,进制粒机压制成规格为 1.5 mm×3.0 mm 的亲虾饲料。50℃烘 12 h,烘干后,储存于阴凉避光处保存备用。

表 1 实验饲料配方和营养组成
Tab. 1 Diet formulation and nutritional composition

成分组成 ingredient	%, DM		
	饲料 1 Diet 1	饲料 2 Diet 2	饲料 3 Diet 3
鱼粉 fish meal	40.0	40.0	40.0
酪蛋白 casein	5.0	6.0	3.0
贻贝粉 mussel meal	15.0	15.0	10.0
虾糠粉 shrimp head meal	10.0	—	—
胆固醇 cholesterol	0.5	0.5	0.5
高筋粉 wheat gluten meal	15.75	14.75	12.75
磷脂 phospholipid	2.0	2.0	2.0
胆碱 choline	1.0	1.0	1.0
鱼油 fish oil	7.0	7.0	7.0
磷虾粉 krill meal	—	10.0	20.0
磷酸二氢钙 Ca(H ₂ PO ₄) ₂	1.5	1.5	1.5
维生素预混料 ¹⁾ vitamin mix ¹⁾	0.5	0.5	0.5
矿物质预混料 ²⁾ mineral mix ²⁾	0.5	0.5	0.5
虾青素 astaxanthin	0.5	0.5	0.5
维生素 C vitamin C	0.75	0.75	0.75
营养成分分析 proximate composition			
粗蛋白 protein	48.64±0.27	51.62±0.14	52.26±0.02
粗脂肪 lipid	15.06±0.37	16.69±0.22	16.59±0.31
灰分 ash	15.93±0.04	12.30±0.06	12.68±0.00

注: 1) 复合维生素(mg/kg 或 g/kg 饲料): 硫胺素, 25 mg; 核黄素, 45 mg; 盐酸吡哆醇, 20 mg; 维生素 B₁₂, 0.1 mg; 维生素 K₃, 10 mg; 肌醇, 800 mg; 泛酸, 60 mg; 烟酸, 200 mg; 叶酸, 20 mg; 生物素, 1.20 mg; 维生素 A, 32 mg; 维生素 D, 5 mg; 维生素 E, 120 mg; 次粉 18.67 g. 2) 复合矿物质(mg/kg 或 g/kg 饲料): 氟化钠, 2 mg; 碘化钾, 0.8 mg; 氯化钴, 50 mg; 硫酸铜, 10 mg; 硫酸亚铁, 80 mg; 硫酸锌, 50 mg; 硫酸镁, 1200 mg; 磷酸二氢钙, 3000 mg; 氯化钠, 100 mg; 沸石粉, 15.51 g。
Note: 1) Vitamin premix (mg/kg or g/kg diet): thiamine 25 mg, riboflavin 45 mg, pyridoxine 20 mg, vitamin B₁₂ 0.1 mg, menadione 10 mg, inositol 800 mg, pantothenate 60 mg, tocopherol acetate 200 mg, folic acid 20 mg, biotin 1.2 mg, vitamin A 32 mg, vitamin D 5 mg, vitamin E 120 mg, wheat flour 18.67 g. 2) Mineral premix (mg/kg or g/kg diet): NaF 2 mg; KI 0.8 mg; CoCl₂·6H₂O 50 mg; CuSO₄·5H₂O 10 mg; FeSO₄·7H₂O 80 mg; ZnSO₄·7H₂O 50 mg; MnSO₄·4H₂O 1200 mg; Ca(H₂PO₄)₂·H₂O 3000 mg; NaCl 100 mg; mordenzeo15.51 g.

1.2 实验方法

1.2.1 实验设计 实验分 4 组, 分别投喂饲料 1、饲料 2、饲料 3 和沙蚕(对照组, 沙蚕采用活体投喂, 投喂前用浓度为 50 mg/L 的高锰酸钾溶液浸泡 2~3 min 后清水洗净), 每个实验组 80 尾虾, 雌雄比例 1:1, 分开饲养于 3 m² 的水泥池内, 每个水泥池里 20 尾虾, 每个实验组雌雄亲虾各两个重

复。营养强化持续的时间为 60 d, 此阶段人工配合饲料的日投喂量为亲虾体重的 3%~5%, 沙蚕的日投喂量为亲虾体重的 20%~30%。每天分 4 次进行投喂, 日换水量为水体总量的 90%~100%。营养强化结束后, 对取样之后的雌亲虾进行单侧眼柄摘除手术以进行催熟, 之后进行人工授精操作, 测量产卵相关的指标, 这部分内容后续另行发表。

1.2.2 养殖条件 实验用水取自渤海湾, 经沉淀、沙滤、消毒后使用, 营养强化期间的水温维持在 27~28℃、盐度 28~33、pH 8.0~8.5、溶氧>5 mg/L、总氨氮<0.5 mg/L、亚硝酸盐<0.1 mg/L、水深 50~60 cm。

1.2.3 样品采集及分析方法 实验开始时, 对每尾亲虾的单侧眼柄套上眼标并称量初始体重, 眼标用来将亲虾个体进行区分。随机选取相同规格的 10 尾雌虾解剖后测量其肝胰腺重, 计算初始肝胰腺指数, 当前阶段雌虾体内无性腺发育。配合饲料投喂 60 d 后, 当 20%~30% 的雌亲虾出现性腺发育时, 称量全部的亲虾体重, 各处理组每个平行各取 6 尾性腺发育完全的雌亲虾解剖取其肝胰腺和性腺称重, 计算营养强化之后的肝胰腺、性腺指数。其中, 肝胰腺指数=肝胰腺重量/雌性亲虾体重×100%, 性腺指数=性腺重量/雌性亲虾体重×100%。称重后的肝胰腺、性腺迅速保存于液氮中, 用于后续脂肪酸的测定。

饲料常规成分分析: 粗蛋白含量测定参照国家标准 GB/T 6432-1994 采用凯氏定氮法, 用意大利 VELP 半自动凯氏定氮仪—UDK129 测定; 粗脂肪含量测定参照国家标准 GB/T 6433-1994, 以石油醚为抽提液, 用丹麦 FOSS 脂肪测定仪 SOXTEC 2050 测定; 灰分的测定参照国家标准 GB/T 6438-1992, 在 550℃ 马福炉中灼烧至恒重后测定。

饲料、肝胰腺和性腺中的脂肪酸含量测定参考 Mourente 等^[10], 采用气相色谱法(GS, HP6890, USA), 各种脂肪酸的定性采用与标准样品保留时间比较的方法, 定量采用面积归一化法计算。

1.2.4 统计分析 各处理组亲虾增重率、肝胰腺指数、性腺指数、各脂肪酸含量利用 SPSS19.0 统计分析软件对数据进行 ANOVA 单因素分析和 Duncan's 多重比较分析, $P < 0.05$ 为显著水平, 数据值以平均值±标准差($\bar{x} \pm SD$)表示。

2 结果与分析

2.1 亲虾的体重增重率、肝胰腺指数和性腺指数

不同饲料配方亲虾体重增重率如表 2 所示, 从表中可以看出, 营养强化之后, 各处理组亲虾体重均有所增加, 但增重率有所不同, 且雌亲虾体重增重率高于雄亲虾。雌虾增重率最高的是对照组, 达(78.10±6.38)%, 接下来依次是饲料 2 组、饲料 3 组和饲料 1 组, 分别为(47.91±4.45)%、(47.08±4.54)%和(38.61±3.63)%。单因素方差分析, 对照组与其他处理组差异性显著($P < 0.05$), 饲料 1 组、饲料 2 组、饲料 3 组之间, 体重增重率均不显著($P > 0.05$)。雄亲虾体重增重率最高的也是对照组, 达(64.48±5.74)%, 之后依次为饲料 3 组、饲料 2 组和饲料 1 组, 数值分别是: (40.70±3.32)%、(32.41±4.60)%和(29.00±2.93)%。单因素方差分析, 对照组与饲料 2 组、饲料 1 组差异显著($P < 0.05$), 而与饲料 3 组差异不显著($P > 0.05$)。饲料 1 组、饲料 2 组、饲料 3 组之间, 体重增重率均不显著($P > 0.05$)。

实验初始肝胰腺指数为(3.24±0.49)%, 从表 2 中可以看出, 各组的肝胰腺指数均低于此数值。雌亲虾肝胰腺指数最大的为饲料 3 组, 达(2.95±0.21)%, 饲料 1 组的肝胰腺指数为(2.76±0.04)%, 统计分析表明, 饲料 3 组与饲料 1 组无显著差异($P > 0.05$)。饲料 2 组和对照组的肝胰腺指数分别为(2.37±0.02)%和(2.50±0.15)%, 统计分析表明, 饲料 2 组、对照组之间差异性不显著($P > 0.05$), 但与饲料 3 组、饲料 1 组差异显著($P < 0.05$)。

对比亲虾的性腺发育情况, 发现不同处理组的亲虾性腺均有所发育, 但其发育程度不一。性腺指数最大的是饲料 2 组, 为(5.70±0.24)%, 与其他 3 个组均差异显著($P < 0.05$)。饲料 3 组的性腺指数为(5.30±0.26)%, 对照组性腺指数为(5.19±0.09)%, 两组间差异不显著($P > 0.05$)。饲料 1 组的性腺指数最小, 为(4.31±0.20)%, 与其余各组间差异均显著($P < 0.05$)。

2.2 实验饲料的脂肪酸组成

3 个人工配合饲料组及沙蚕的脂肪酸组成测量结果如表 3 所示。从表 3 中可以看出, 4 个组的

总饱和脂肪酸(SFA)含量在(19.03±0.50)%到(21.29±0.87)%之间, 沙蚕的总饱和脂肪酸含量最高, 饱和脂肪酸中含量较高的两种脂肪酸是棕榈酸(C_{16:0})和硬脂酸(C_{18:0})。4 个组的总单不饱和脂肪酸(MUFA)含量在(21.67±0.94)%到(24.87±0.29)%之间, 沙蚕最低, 并且与其余 3 个组差异显著($P<0.05$), 单独各脂肪酸之间也存在较大的差异。棕榈油酸(C_{16:1n-7})在饲料 1 中的含量仅有(2.78±0.12)%, 低于其余 3 个组且存在显著差异($P<0.05$); 但饲料 1 中含有最高含量的油酸(C_{18:1n-9}), 达(15.30±0.17)%,

表 2 各实验组凡纳滨对虾亲虾体重增重率及雌亲虾肝胰腺和性腺指数
Tab. 2 Weight gain ratio in *Litopenaeus vannamei* and the average hepatopancreas index and gonadal index in female prawns fed with different diets

%; n=6; $\bar{x} \pm SD$; FW

项目 item	亲虾类别 experimental group			
	饲料 1 组 diet 1	饲料 2 组 diet 2	饲料 3 组 diet 3	沙蚕组(对照) <i>Nereis</i> (control)
雌性亲虾增重率 weight gain ratio of female prawns	38.61±3.63 ^a	47.91±4.45 ^a	47.08±4.54 ^a	78.10±6.38 ^b
雄性亲虾增重率 weight gain ratio of male prawns	29.00±2.93 ^a	32.41±4.60 ^a	40.70±3.32 ^{ab}	64.48±5.74 ^b
肝胰腺指数 hepatopancreas index	2.76±0.04 ^a	2.37±0.02 ^b	2.95±0.21 ^a	2.50±0.15 ^b
性腺指数 gonadal index	4.31±0.20 ^a	5.70±0.24 ^c	5.30±0.26 ^b	5.19±0.09 ^b

注: 同行不同的上标字母代表差异显著($P<0.05$).
Note: Different superscript letters in the same row mean significant difference ($P<0.05$).

表 3 人工配合饲料和沙蚕的脂肪酸组成
Tab. 3 Fatty acids profiles of different diets and *Nereis*

%; n=6; $\bar{x} \pm SD$; DW

脂肪酸组成 fatty acids profile	饲料 1 diet 1	饲料 2 diet 2	饲料 3 diet 3	沙蚕(FW) <i>Nereis</i> (control)
C _{13:0}	2.34±0.15 ^a	3.03±0.37 ^b	3.09±0.01 ^b	1.02±0.03 ^c
C _{14:0}	0.04±0.01 ^a	0.06±0.01 ^a	0.04±0.00 ^a	0.25±0.02 ^b
C _{15:0}	0.24±0.01 ^a	0.26±0.02 ^a	0.31±0.02 ^a	2.36±0.09 ^b
C _{16:0}	8.58±0.36 ^a	8.78±0.27 ^a	8.53±0.28 ^a	8.88±0.43 ^a
C _{17:0}	2.17±0.08 ^a	2.17±0.13 ^a	2.21±0.16 ^a	2.11±0.10 ^a
C _{18:0}	5.66±0.01 ^b	5.26±0.04 ^c	4.85±0.06 ^d	6.67±0.09 ^a
总饱和脂肪酸 Σ SFA	19.03±0.46 ^b	19.56±0.85 ^b	19.03±0.50 ^b	21.29±0.87 ^a
C _{16:1n-7}	2.78±0.12 ^c	3.79±0.25 ^a	3.34±0.01 ^b	3.48±0.03 ^b
C _{17:1n-7}	0.34±0.04 ^c	1.53±0.05 ^b	2.37±0.17 ^a	1.41±0.10 ^b
C _{18:1n-9}	15.30±0.17 ^a	12.12±0.48 ^b	11.92±0.19 ^b	7.54±0.09 ^c
C _{18:1n-7}	3.38±0.02 ^d	4.04±0.07 ^c	4.58±0.03 ^b	7.01±0.04 ^a
C _{20:1n-9}	2.93±0.03 ^a	2.61±0.31 ^a	2.66±0.02 ^a	2.23±0.12 ^a
总单不饱和脂肪酸 Σ MUFA	24.73±0.08 ^a	24.09±0.44 ^a	24.87±0.29 ^a	21.67±0.94 ^b
C _{18:3n-3}	0.25±0.02 ^a	1.12±0.91 ^a	0.54±0.02 ^a	0.75±0.46 ^a
C _{18:2n-6}	7.47±0.09 ^b	6.29±0.25 ^c	5.37±0.12 ^d	8.32±0.29 ^a
C _{20:5n-3} (EPA)	8.55±0.36 ^c	11.04±0.23 ^b	11.53±0.02 ^b	14.43±0.26 ^a
C _{20:4n-6} (AA)	0.12±0.00 ^c	0.80±0.08 ^b	0.81±0.02 ^b	1.19±0.14 ^a
C _{20:2n-6}	0.27±0.01 ^b	0.25±0.04 ^b	0.24±0.01 ^b	1.18±0.05 ^a
C _{22:6n-3} (DHA)	11.10±0.13 ^c	15.47±0.24 ^b	16.99±0.07 ^a	17.87±0.46 ^a
C _{22:4n-6}	1.18±0.01 ^c	2.34±0.19 ^b	2.75±0.04 ^a	2.94±0.01 ^a
总多不饱和脂肪酸 Σ PUFA	28.94±0.60 ^c	37.31±1.13 ^b	38.23±0.15 ^b	46.68±0.68 ^a
n-6 PUFA	9.04±0.09 ^c	9.68±0.56 ^b	9.17±0.07 ^b	13.63±0.01 ^a
n-3 PUFA	19.90±0.51 ^d	27.63±0.56 ^c	29.06±0.07 ^b	33.05±0.67 ^a
C _{n-3} /C _{n-6}	2.20±0.03 ^d	2.85±0.10 ^b	3.17±0.02 ^a	2.42±0.04 ^c
Σ PUFA/ Σ SFA	1.52±0.01 ^c	1.91±0.14 ^b	2.01±0.04 ^b	2.19±0.12 ^a

注: 脂肪酸含量以各脂肪酸甲酯占总脂肪酸甲酯的比例表示。同行不同的上标字母代表差异显著($P<0.05$).
Note: Ratios of fatty acid methyl ester to total fatty acid methyl esters. Different superscript letters in the same row mean significant difference ($P<0.05$).

与其余各组差异显著($P<0.05$)。总多不饱和脂肪酸(PUFA)在 4 个组之间差异较大, 饲料 1 的含量仅为(28.94±0.60)%, 饲料 2 和饲料 3 分别为(37.31±1.13)%和(38.23±0.15)%, 沙蚕体内的含量为(46.68±0.68)%, 除饲料 2 与饲料 3 差异不显著($P>0.05$)外, 其余各组均存在显著差($P<0.05$)。EPA(C_{20:5n-3})、DHA(C_{22:6n-3})和 AA(C_{20:4n-6}) 3 种重要的多不饱和脂肪酸在沙蚕体内的含量高于 3 个人工配合饲料组, 并且 EPA 和 AA 的含量与其他 3 个组间均存在显著性差异($P<0.05$); 但相比之下, 饲料 2 和饲料 3 有与沙蚕更接近的 EPA、DHA 和 AA 含量。

n-6 系列多不饱和脂肪酸的含量在沙蚕体内最高, 达(13.63±0.01)%, 与其余各组差异显著($P<0.05$), 饲料 1 中含量最低, 为(9.04±0.09)%, 饲料 2 和饲料 3 中的含量分别为(9.68±0.56)%和(9.17±0.07)%。沙蚕体内的 n-3 系列多不饱和脂肪酸含量同样高于其余 3 个组人工配合饲料, 达(33.05±0.67)%。C_{n-3}/C_{n-6} 数值最大的是饲料 3, 为(3.17±0.02), 接下来依次是饲料 2、沙蚕和饲料 1, 其数值分别为 2.85±0.10、2.42±0.04 和 2.20±0.03, 统计分析表明, 4 个组间彼此均存在显著差异($P<0.05$)。

2.3 各实验组肝胰腺脂肪酸组成

各实验组亲虾肝胰腺脂肪酸组成如表 4 所示。

表 4 各处理组凡纳滨对虾肝胰腺中的脂肪酸组成
Tab. 4 Fatty acids profiles of hepatopancreas in *Litopenaeus vannamei* fed with different diets
%; n=6; $\bar{x} \pm \text{SD}$; FW

脂肪酸组成 fatty acids profile	饲料 1 组 diet 1	饲料 2 组 diet 2	饲料 3 组 diet 3	沙蚕组(对照) <i>Nereis</i> (control)
C _{13:0}	1.57±0.39 ^a	1.29±0.01 ^a	1.23±0.02 ^a	0.73±0.07 ^b
C _{14:0}	0.30±0.01 ^{ab}	0.37±0.03 ^a	0.27±0.03 ^b	0.04±0.02 ^c
C _{15:0}	1.32±0.07 ^b	1.18±0.05 ^b	1.23±0.16 ^b	2.31±0.15 ^a
C _{16:0}	18.57±1.62 ^a	22.18±1.41 ^a	23.31±0.09 ^a	21.57±0.83 ^a
C _{17:0}	4.58±0.54 ^a	4.42±1.16 ^a	4.38±0.40 ^a	4.64±0.03 ^a
C _{18:0}	8.02±0.10 ^b	7.31±1.20 ^b	9.31±0.17 ^a	7.90±0.50 ^b
C _{20:0}	0.34±0.03 ^a	0.20±0.04 ^b	0.19±0.01 ^b	0.20±0.01 ^b
C _{21:0}	0.19±0.00 ^a	0.16±0.01 ^b	0.13±0.01 ^c	0.14±0.01 ^c
总饱和脂肪酸 Σ SFA	34.89±0.62 ^b	36.74±1.05 ^{ab}	40.05±0.39 ^a	37.53±0.91 ^{ab}
C _{16:1n-7}	4.38±0.71 ^b	5.36±0.19 ^{ab}	5.88±0.39 ^{ab}	6.44±0.09 ^a
C _{17:1n-7}	0.36±0.09 ^c	2.40±0.05 ^b	3.13±0.10 ^a	2.45±0.20 ^b
C _{18:1n-9}	9.98±0.05 ^b	10.02±0.10 ^b	11.29±0.14 ^a	10.83±0.52 ^a
C _{18:1n-7}	9.72±0.38 ^b	9.94±0.00 ^b	8.74±0.56 ^c	11.60±0.72 ^a
C _{20:1n-9}	6.54±1.29 ^a	6.33±0.28 ^a	4.00±0.77 ^b	5.04±0.78 ^{ab}
总单不饱和脂肪酸 Σ MUFA	30.98±0.13 ^c	34.05±0.42 ^b	33.04±1.34 ^b	36.36±0.70 ^a
C _{18:3n-3}	1.10±0.25 ^a	0.66±0.01 ^b	0.92±0.32 ^{ab}	0.61±0.05 ^b
C _{18:2n-6}	4.58±0.22 ^a	3.32±0.38 ^b	3.13±0.14 ^{bc}	2.12±0.00 ^c
C _{20:5n-3} (EPA)	6.50±0.76 ^a	4.03±0.15 ^b	5.36±0.27 ^{ab}	4.47±0.23 ^b
C _{20:4n-6} (AA)	2.08±0.34 ^a	1.32±0.08 ^b	1.53±0.26 ^b	1.27±0.05 ^b
C _{20:2n-6}	2.21±0.40 ^b	3.25±0.77 ^a	1.83±0.01 ^{bc}	1.18±0.23 ^c
C _{22:6n-3} (DHA)	2.79±0.02 ^a	0.93±0.57 ^b	0.78±0.57 ^b	1.23±0.02 ^b
C _{22:4n-6}	1.36±0.56 ^a	1.24±0.29 ^{ab}	0.66±0.20 ^b	1.32±0.03 ^a
总多不饱和脂肪酸 Σ PUFA	20.62±2.11 ^a	14.75±1.32 ^b	14.21±1.70 ^b	12.20±0.47 ^b
总脂肪酸 TFA	86.49±1.63 ^a	85.54±1.95 ^a	87.30±0.96 ^a	86.09±2.09 ^a
n-6 PUFA	10.23±1.08 ^a	9.13±0.59 ^a	7.15±1.18 ^b	5.89±0.21 ^b
n-3 PUFA	10.39±1.03 ^a	5.62±0.73 ^b	7.06±1.25 ^b	6.31±0.26 ^b
C _{n-3} /C _{n-6}	1.02±0.09 ^a	0.61±0.04 ^b	0.99±0.05 ^a	1.07±0.00 ^a
Σ PUFA/Σ SFA	0.59±0.17 ^a	0.40±0.02 ^b	0.35±0.07 ^b	0.33±0.00 ^b

注: 脂肪酸含量以各脂肪酸甲酯占总脂肪酸甲酯的比例表示。同行不同的上标字母代表差异显著($P<0.05$)。
Note: Ratios of fatty acid methyl ester to total fatty acid methyl esters. Different superscript letters in the same row mean significant difference ($P<0.05$).

从表 4 中可以看出, 主要的饱和脂肪酸是棕榈酸, 四组之间差异不显著($P>0.05$)。4 个组中的总单不饱和脂肪酸含量在(30.98±0.13)%到(36.36±0.70)%之间, 对照组含量最高, 且与其余 3 个组存在显著差异($P<0.05$)。总多不饱和脂肪酸在饲料 2 组、饲料 3 组和对照组间差异不显著($P>0.05$), 但与饲料 1 组差异显著($P<0.05$), 同时, 饲料 1 组肝胰腺中的 EPA、AA、DHA 和亚油酸($C_{18:2n-6}$)含量均高于其他 3 个组。

2.4 各处理组性腺脂肪酸组成

各实验组亲虾性腺脂肪酸组成如表 5 所示。从表中可以看出, 4 个组的总饱和脂肪酸含量在(33.93±0.17)%到(39.88±0.41)%之间, 对照组含量最低, 饲料 1 组含量最高, 棕榈酸为主要饱和脂肪酸。总单不饱和脂肪酸含量在(33.82±1.24)%到(37.68±0.90)%之间, 对照组最低, 饲料 3 组最高。对照组的总多不饱和脂肪酸含量最高, 达(23.53±0.86)%, 其余依次为饲料 3 组、饲料 2 组和饲料

表 5 各处理组凡纳滨对虾性腺中的脂肪酸组成
Tab. 5 Fatty acids profiles of gonads in *Litopenaeus vannamei* fed with different diets

%; n=6; $\bar{x}$ ±SD; FW

脂肪酸组成 fatty acids profile	饲料 1 组 diet 1	饲料 2 组 diet 2	饲料 3 组 diet 3	沙蚕组(对照) <i>Nereis</i> (control)
C _{12:0}	0.63±0.13 ^a	0.59±0.17 ^a	0.38±0.03 ^a	0.40±0.02 ^a
C _{13:0}	2.80±0.05 ^a	2.67±0.83 ^a	2.37±0.09 ^a	2.17±0.06 ^a
C _{14:0}	0.17±0.00 ^{ab}	0.27±0.03 ^a	0.25±0.06 ^a	0.11±0.02 ^b
C _{15:0}	0.96±0.05 ^b	0.98±0.02 ^b	0.86±0.09 ^b	1.37±0.34 ^a
C _{16:0}	22.43±0.84 ^a	20.52±0.99 ^{ab}	19.45±1.08 ^b	17.60±0.10 ^b
C _{17:0}	5.25±0.12 ^b	5.81±0.27 ^a	4.58±0.22 ^c	4.70±0.25 ^c
C _{18:0}	7.15±0.24 ^{bc}	7.36±0.02 ^{ab}	7.57±0.21 ^a	6.95±0.19 ^c
C _{20:0}	0.27±0.01 ^b	0.54±0.23 ^a	0.38±0.13 ^{ab}	0.49±0.05 ^{ab}
C _{21:0}	0.22±0.07 ^a	0.22±0.10 ^a	0.12±0.03 ^a	0.14±0.02 ^a
总饱和脂肪酸 Σ SFA	39.88±0.41 ^a	38.96±1.65 ^a	35.96±1.49 ^b	33.93±0.17 ^b
C _{16:1n-7}	9.99±0.61 ^a	8.58±0.55 ^b	8.13±1.02 ^b	7.74±0.17 ^b
C _{17:1n-7}	1.71±0.01 ^c	2.50±0.15 ^b	4.92±0.12 ^a	2.31±0.15 ^b
C _{18:1n-9}	14.67±0.77 ^a	14.28±0.99 ^a	15.34±0.80 ^a	14.79±1.08 ^a
C _{18:1n-7}	7.71±0.06 ^b	8.30±0.31 ^a	7.50±0.42 ^b	7.52±0.09 ^b
C _{20:1n-9}	2.26±0.04 ^a	1.63±0.64 ^a	1.79±0.58 ^a	1.46±0.09 ^a
总单不饱和脂肪酸 Σ MUFA	36.34±1.49 ^{ab}	35.29±0.44 ^{bc}	37.68±0.90 ^a	33.82±1.24 ^c
C _{18:3n-3}	0.54±0.10 ^b	1.01±0.24 ^a	0.80±0.02 ^a	0.87±0.01 ^a
C _{18:2n-6}	4.72±0.47 ^a	5.22±0.92 ^a	4.84±0.98 ^a	5.58±1.01 ^a
C _{20:5n-3} (EPA)	4.58±0.20 ^c	6.30±0.57 ^b	7.85±0.46 ^a	7.86±0.82 ^a
C _{20:4n-6} (AA)	0.88±0.13 ^b	1.14±0.28 ^b	1.79±0.29 ^a	1.66±0.15 ^a
C _{20:2n-6}	1.07±0.03 ^b	1.08±0.42 ^b	1.45±0.29 ^{ab}	2.49±0.11 ^a
C _{22:6n-3} (DHA)	1.26±0.06 ^c	2.49±0.10 ^b	2.51±0.17 ^b	3.54±0.00 ^a
C _{22:4n-6}	0.82±0.01 ^b	1.52±0.39 ^a	1.92±0.23 ^a	1.53±0.30 ^a
总多不饱和脂肪酸 Σ PUFA	13.87±0.33 ^d	18.76±0.01 ^c	21.16±1.61 ^b	23.53±0.86 ^a
总脂肪酸 TFA	90.09±1.57 ^c	93.01±1.22 ^{ab}	94.80±2.56 ^a	91.28±1.93 ^{bc}
n-6 PUFA	7.49±0.29 ^b	8.96±0.83 ^{ab}	10.00±1.67 ^a	11.26±1.66 ^a
n-3 PUFA	6.38±0.04 ^c	9.80±0.84 ^b	11.16±0.59 ^a	12.27±0.80 ^a
Cn-3/Cn-6	0.85±0.02 ^a	1.09±0.19 ^a	1.12±0.12 ^a	1.09±0.23 ^a
Σ PUFA/Σ SFA	0.35±0.01 ^d	0.48±0.02 ^c	0.59±0.03 ^b	0.69±0.02 ^a

注: 脂肪酸含量以各脂肪酸甲酯占总脂肪酸甲酯的比例表示。同行不同的上标字母代表差异显著($P<0.05$)。
Note: Ratios of fatty acid methyl ester to total fatty acid methyl esters. Different superscript letters in the same row mean significant difference ($P<0.05$).

1组,其数值分别为 $(21.16 \pm 1.61)\%$ 、 $(18.76 \pm 0.01)\%$ 和 $(13.87 \pm 0.33)\%$,4个组之间均存在显著差异($P < 0.05$)。对照组和饲料3组的EPA含量不存在显著性差异($P > 0.05$),但与饲料2组和饲料1组差异显著($P < 0.05$)。AA含量有与EPA相似的结果,亚油酸含量在4个组之间不存在显著差异($P > 0.05$)。DHA含量在对照组最高,为 $(3.54 \pm 0.00)\%$,与其余3个组差异显著($P < 0.05$)。虽然n-6系列多不饱和脂肪酸和n-3系列多不饱和脂肪酸在4个组之间有一定的差异,但 C_{n-3}/C_{n-6} 比值4个组间无显著差异($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 不同饲料配方对亲虾体重增重率的影响

正常情况下,营养强化之后的亲虾,体内会积累较多的营养物质,具体表现在体长或体重的增加方面。刘立鹤等^[11]的研究结果发现,营养强化阶段的亲虾需积累并储存足够的营养物质,这些营养物质是亲虾正常的性腺发育、受精产卵的保障,同时也是受精卵孵化、无节幼体变态的基本需求。

亲虾营养强化与产卵期间,沙蚕是公认的有效天然饵料。本研究中,投喂沙蚕对照组的亲虾在营养强化阶段的增重率比另外3个实验组大,雌雄亲虾的增重率分别达 $(78.10 \pm 6.38)\%$ 和 $(64.48 \pm 5.74)\%$ 。虽然,投喂人工配合饲料实验组的亲虾增重率低于沙蚕组,但雌性亲虾中增重率最大也可达到 $(47.91 \pm 4.45)\%$,最小的为 $(38.61 \pm 3.63)\%$ 。这些结果说明,3种配方的人工配合饲料在亲虾营养强化阶段也能较有效地促进亲虾的增长,也说明人工配合饲料的营养配比较为合理,可在一定程度上满足亲虾性腺发育期间所需的营养积累。

3.2 不同饲料配方对亲虾肝胰腺指数和性腺指数的影响

肝胰腺指数(HPI)是用作评估对虾亲虾繁殖力的参考指标之一。性腺发育期间,肝胰腺能够吸收饵料中的脂类,对脂类进行加工处理后输送到卵巢,用于卵巢处的脂类积累。研究发现,当亲虾性腺快速发育时,储存于肝胰腺中的脂类(磷脂

居多)、蛋白质和氨基酸等营养物质会被转移到性腺加以利用^[12]。

本研究中,实验开始时,所测的对虾初始平均肝胰腺指数为 $(3.24 \pm 0.49)\%$;营养强化结束后,四个处理组的肝胰腺指数均小于此数值,说明实验期间,各组饲料的营养物质均通过肝胰腺向性腺进行了一定程度的转移,但对营养物质转移的速率存在差异。4个处理组中,饲料2组的肝胰腺指数最小,其数值为 $(2.37 \pm 0.02)\%$,对照组的肝胰腺指数高于饲料2组,而小于饲料1组和饲料3组,单因素方差分析表明,对照组与饲料3组、饲料1组差异显著($P < 0.05$),而与饲料2组差异不显著($P > 0.05$)。从研究结果可以看出,饲料2组和对照组的营养物质得到了更为有效的转运。

性腺重量与体重的比值被称为性腺指数(GSI),它能反映出亲虾性腺的发育状况,测量亲虾的性腺指数是判断亲虾性腺大小、质量变化的最简单的方法。营养强化阶段,不同配方的人工配合饲料包括沙蚕在内,其营养组成不同,对亲虾的性腺发育有不同的促进效果。在此阶段,肝胰腺源源不断地往性腺输送加工处理好的营养物质,而性腺对于特定营养物质的需求量不同,加之不同营养物质的积累速度也存在差异,最终结果体现在了性腺指数的差异上。陈泳先等^[13]的研究结果表明性腺发育状况较好的亲虾,其性腺指数也较大;同样,Palacios等^[8]的研究也表明亲虾的产卵次数与其性腺指数大小呈正相关。

从本结果来看,饲料2组具有最大的性腺指数,达 $(5.70 \pm 0.24)\%$,与其余三组差异显著($P < 0.05$)。饲料3组与对照组的性腺指数分别为 $(5.30 \pm 0.26)\%$ 和 $(5.19 \pm 0.09)\%$,二者不存在显著差异($P > 0.05$)。饲料1组的性腺指数最小,为 $(4.31 \pm 0.20)\%$ 。研究结果可以看出,饲料中添加一定比例(10%~20%)的磷虾粉较不添加磷虾粉能够更有效地促进凡纳滨对虾亲虾的性腺发育。

3.3 饲料脂肪酸组成对亲虾性腺发育的影响

Harrison^[14]的研究表明亲虾的性腺发育和产卵与所供给的饵料脂肪酸组成联系密切。亲虾性腺发育过程中需要大量的多不饱和脂肪酸(PUFA),而对虾属不具备合成PUFA的能力,因此只能从

饵料中摄取。Wouters 等^[15]的研究结果表明, 长期食用不含 PUFA 饲料的亲虾性腺发育会终止。EPA、DHA 和 AA 是 3 种重要的高不饱和脂肪酸, 其含量是衡量饵料营养价值标准之一。EPA 和 DHA 是组成磷脂、胆固醇酯的脂肪酸^[16], AA 能够作为前体合成对虾前列腺素类物质^[17]。本研究中, 投喂 PUFA 含量低的饲料 1(未添加磷虾粉)处理组的亲虾肝胰腺中含有较高含量的 EPA、DHA 和 AA, 而性腺中相应的 PUFA 含量较低, 某些方面能说明饲料 1 处理组亲虾体内肝胰腺中吸收的 PUFA 没有有效的往性腺中进行转移, 这也与饲料 1 具有较大的肝胰腺指数相对应。

Wouters 等^[18]的研究表明饲料中 PUFA 含量越高, 凡纳滨对虾性腺的 PUFA 含量也越高, 但是高含量的 PUFA 对性腺指数的提高无较明显的促进作用。本研究中沙蚕体内的 PUFA 含量最高, 达(46.68±0.68)%, 饲料 2 和饲料 3 分别为(37.31±1.13)%、(38.23±0.15)%, 饲料 1 的含量最低, 仅为(28.94±0.60)%。相应 4 个处理组性腺中的总 PUFA 分别为(23.53±0.86)%、(18.76±0.01)%、(21.16±1.61)%和(13.87±0.33)%, 从数据中可以发现, 饵料的 PUFA 含量与亲虾性腺内的 PUFA 含量呈正相关。另外, 投喂最高 PUFA 含量的对照组, 其性腺指数为(5.19±0.09)%, 低于饲料 2 组和饲料 3 组的性腺指数, 饲料 2 组和饲料 3 组的性腺指数分别为(5.70±0.24)%和(5.30±0.26)%, 这方面的结果与 Wouters 等^[18]的研究相接近。

亲虾饲料中不仅要求有丰富的 PUFA, 还要保持各脂肪酸的适宜比例。Millamena 等^[19]的研究表明, 斑节对虾的产卵、孵化效率随饲料中 $\Sigma n-3/\Sigma n-6$ 比值的提高而增加, 并建议亲虾饲料中应含有较高的 $n-3/n-6$ 比值。Lytle 等^[20]分析研究了西半球亲虾常用天然饵料的脂肪酸组成, 发现这些天然饵料的 $\Sigma n-3/\Sigma n-6$ 比值有相应的平衡关系。Wouters 等^[18]的研究表明, 亲虾饵料的 $\Sigma n-3/\Sigma n-6$ 比值与凡纳滨对虾亲虾性腺内的 $\Sigma n-3/\Sigma n-6$ 比值高度正相关, 本研究结果与此相一致。本研究中, 饲料 3 的 $\Sigma n-3/\Sigma n-6$ 比值最大, 为 3.17±0.02, 相应地, 性腺内的 $\Sigma n-3/\Sigma n-6$ 比值也最大, 为 1.12±0.12, 其余各处理组饲料中的

$\Sigma n-3/\Sigma n-6$ 比值也与相对应的性腺内的 $\Sigma n-3/\Sigma n-6$ 比值正相关。

本研究中, 值得关注的一点是: $\Sigma n-3/\Sigma n-6$ 比值与亲虾性腺大小不呈正相关。饲料 3 中含有最大的 $\Sigma n-3/\Sigma n-6$ 比值, 达 3.17±0.02, 且与其余 3 个组差异显著($P<0.05$); 但饲料 3 组的性腺指数却不是最大的, 小于饲料 2 组的性腺指数, 且存在显著差异($P<0.05$)。楼乔明等^[21]的研究发现, 南极磷虾粉体内脂肪酸组成具有高含量的 Σ PUFA, 且 PUFA 以 $n-3$ 系列脂肪酸为主, 占 45.41%, $n-6$ 系列脂肪酸的含量仅为 2.24%; 饲料 3 中添加了 20% 含量的磷虾粉, 因此饲料内含有较高的 $n-3$ 系列脂肪酸, 而 $n-6$ 系列脂肪酸的含量较少, 进而导致 $\Sigma n-3/\Sigma n-6$ 比值的增高。结果可能说明, 亲虾饲料内并不是 $\Sigma n-3/\Sigma n-6$ 比值越大效果越好, 可能存在一个最能有效促进性腺发育的临界值。

3.4 饲料营养及其比对亲虾性腺发育的影响

亲虾的培育过程中, 体内需积累大量的营养物质, 亲虾培育质量的好坏, 营养是限制性因素之一。Brown 等^[22]的研究结果表明, 南美蓝对虾亲虾的性腺发育和产卵与其供给的饵料营养状况密切相关。Wouters 等^[17]的研究结果发现, 南美白对虾亲虾性腺发育和成熟过程中, 供给的饵料不足或者营养不当, 将会影响亲虾的性腺成熟和繁殖性能, 甚至连正常的繁殖活动都可能会因此终止。吴超等^[23]的研究也表明, 饥饿状态下的日本囊对虾亲虾性腺发育缓慢, 不能有效积累营养物质。Palacios 等^[8]推断饥饿状态下的南美白对虾亲虾没有外来能源供给, 饥饿的亲虾可能重吸收了性腺中的营养物质来维持基本的生命活动。

亲虾性腺发育过程中所涉及的主要营养元素包括蛋白质、脂类、维生素、矿物质, 同时一些微量元素可能也影响亲虾的性腺发育, 如类固醇激素、甲基法尼醇等。不同配方的饲料其营养组成也不同, 因此, 研究饲料对亲虾性腺发育的影响其本质是研究不同的营养比对亲虾性腺发育的影响。Harrison^[14]的研究结果表明, 为满足卵黄蛋白的积累, 性腺发育过程中的亲虾需要更多的蛋白质, 同时这些蛋白质也被用来合成相关的激

素及酶类物质。本研究结果也表明,添加一定含量磷虾粉、蛋白含量高的饲料 2 和饲料 3 比蛋白含量低的饲料 1 在促进亲虾体重增长和性腺发育方面具有更好的效果。凡纳滨对虾亲虾产卵周期长、产卵次数多,可能对蛋白质具有更高的需求。Teshima 等^[24]的研究结果发现,胆固醇对亲虾的性腺发育以及产卵孵化具有调节作用,在性腺成熟的亲虾卵巢中具有较高的含量,是一种重要的脂类成分。本研究中,饲料 1 中没有添加磷虾粉,在营养配比中其蛋白质、脂肪含量受到一定的影响,也进一步说明在配合饲料中添加适当比例的磷虾粉对于凡纳滨对虾亲虾性腺发育具有更好的促进作用。

4 结论

通过研究结果可以看出,在促进亲虾体重增长方面,3 个组人工配合饲料均与沙蚕有一定的差距,但也较有效地促进了亲虾的增长。在肝胰腺指数与性腺指数方面,饲料 2 组有比沙蚕组更小的肝胰腺指数及更大的性腺指数,另外,饲料 3 也有大于沙蚕组的性腺指数。饲料脂肪酸组成上,饲料 2 与饲料 3 也有与沙蚕更为接近的脂肪酸含量及配比;并且饲料 2 和饲料 3 两个处理组肝胰腺、性腺脂肪酸组成也与对照组较为接近。说明在促进亲虾性腺发育方面,饲料 2 与饲料 3 可以达到沙蚕的功效,这方面的结论还需要进一步的研究加以验证。沙蚕是公认的亲虾营养强化与产卵期间的有效天然饵料,但本研究中,沙蚕在促进性腺发育方面却没有明显的优越性,推测原因可能是对照组在研究过程中,仅投喂单一的饵料,没有搭配其他生物饵料,缺少营养互补导致此现象。

从本研究结果来看,添加一定含量(10%~20%)磷虾粉的饲料 2 与饲料 3 可在一定程度上成为凡纳滨对虾亲虾营养强化阶段的优良饲料。

参考文献:

[1] Xu Y M, Qiu W H, Yu L P, et al. Nutrition composition and function of Antarctic Krill meal[J]. Modern Fisheries Information, 2010, 25(8): 14–16. [徐吟梅, 邱卫华, 余丽萍, 等. 南极磷虾粉的营养与功能[J]. 渔业信息与战略, 2010,

25(8): 14–16.]

[2] Olsen R E, Suontama J, Langmyhr E, et al. The replacement of fish meal with Antarctic krill, *Euphausia superba*, in diets for Atlantic salmon, *Salmo salar*[J]. Aqu Nutr, 2006, 12(4): 280–290.

[3] Hansen J Ø, Penn M, Øverland M, et al. High inclusion of partially deshelled and whole krill meals in diets for Atlantic salmon (*Salmo salar*)[J]. Aquaculture, 2010, 310(1–2): 164–172.

[4] Olsen R E, Suontama J, Langmyhr E, et al. The replacement of fish meal with Antarctic krill, *Euphausia superba*, in diets for Atlantic salmon, *Salmo salar*[J]. Aqu Nutr, 2006, 12(4): 280–290.

[5] Lu J X, Lin T T, Huang Y Q, et al. Effects of Antarctic krill (*Euphausia superba*) powder on growth and fatty acids composition of rotifer *Brachionus plicatilis*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2012, 19(6): 1018–1026. [陆建学, 林听听, 黄艳青, 等. 南极大磷虾粉对褶皱臂尾轮虫生长及脂肪酸组成的影响[J]. 中国水产科学, 2012, 19(6): 1018–1026.]

[6] Lou Q M, Wang Y M, Liu X F, et al. Analysis of fatty acid composition and mass spectrometry characterization of polyunsaturated fatty acids in *Euphausia superba*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(4): 929–935. [楼乔明, 王玉明, 刘小芳, 等. 南极磷虾脂肪酸组成及多不饱和脂肪酸质谱特征分析[J]. 中国水产科学, 2011, 18(4): 929–935.]

[7] Lin Q W, Ai C X, Li S J, et al. Gonad maturing rhythm and mating rate in *Litopenaeus vannamei* broodstock[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2006, 13(4): 579–584. [林琼武, 艾春香, 李少菁, 等. 凡纳滨对虾亲虾性腺成熟节律和交配率[J]. 中国水产科学, 2006, 13(4): 579–584.]

[8] Palacios E, Ibarra A M, Racotta I S. Tissue biochemical composition in relation to multiple spawning in wild and pond-reared *Penaeus vannamei* broodstock[J]. Aquaculture, 2000, 185(3–4): 353–371.

[9] Du S B, Hu C Q, Shen Q. A review of dietary requirement of shrimp broodstock[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2002, 21(4): 80–91. [杜少波, 胡超群, 沈琪. 亲虾营养需求研究进展[J]. 热带海洋学报, 2002, 21(4): 80–91.]

[10] Mourente G, Tocher D R, Diaz-Salvago E, et al. Study of the n–3 highly unsaturated fatty acids requirement and antioxidant status of *Dentex dentex* larvae at the Artemia feeding stage[J]. Aquaculture, 1999, 179(1–4): 291–307.

[11] Liu L H, Tang J F, Zheng S X. A review of nutrition, energy characteristics and lipid nutrition of crustacean broodstocks[J]. Feed China, 2003(13): 40–42. [刘立鹤, 汤菊芬,

- 郑石轩. 甲壳动物亲体营养、能量特点及其脂质营养综述[J]. 饲料广角, 2003(13): 40–42.]
- [12] Ai C X, Li S J, Wang G Z, et al. Research advancement on requirements of broodstock nutrition for shrimps and crabs[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2003, 22(2): 254–261. [艾春香, 李少菁, 王桂忠, 等. 虾蟹类亲体生殖营养需求研究的进展[J]. 台湾海峡, 2003, 22(2): 254–261.]
- [13] Chen Y X, Jiang W M, Yang Y H, et al. Effect of several baits on the gonadal development in *Penaeus vannamei* Boone parent prawn[J]. Journal of Southern Agriculture, 2011, 42(8): 987–990. [陈泳先, 蒋伟明, 杨彦豪, 等. 几种饵料对南美白对虾亲虾性腺发育的影响[J]. 南方农业学报, 2011, 42(8): 987–990.]
- [14] Harrison K E. The role of nutrition in maturation, reproduction and embryonic development of decapod crustaceans: A review[J]. J Shellf Res, 1990, 9(1): 1–28.
- [15] Wouters R, Gomez L, Lavens P, et al. Feeding enriched Artemia biomass to *Penaeus vannamei* broodstocks: Its effect on reproductive performance and larval quality[J]. J Shellfish Res, 1999, 18(2): 651–656.
- [16] Liu J K, Chen X L, Zhou L, et al. Study on the optimum proportion of DHA and EPA in microdiets for red seabream (*Pagrus major*) larvae[J]. Marine Sciences, 2004, 28(2): 18–20. [刘镜恪, 陈晓琳, 周利, 等. 真鲷仔稚鱼微粒饲料中 DHA 与 EPA 最佳比例的研究[J]. 海洋科学, 2004, 28(2): 18–20.]
- [17] Wouters R, Molina C, Lavens P, et al. Lipid composition and vitamin content of wild female *Litopenaeus vannamei* in different stages of sexual maturation[J]. Aquaculture, 2001, 198(3–4): 307–323.
- [18] Wouters R, Piguave X, Bastidas L, et al. Ovarian maturation and haemolymphatic vitellogenin concentration of Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei* (Boone) fed increasing levels of total dietary lipids and HUFA[J]. Aquac Res, 2001, 32(7): 573–582.
- [19] Millamena O M, Pascual F P. Tissue lipid content and fatty acid composition of *Penaeus monodon* Fabricius broodstock from the wild[J]. J World Aquac Soc, 1990, 21(2): 116–121.
- [20] Lytle J S, Lytle T F, Ogle J T. Polyunsaturated fatty acid profiles as a comparative tool in assessing maturation diets of *Penaeus vannamei*[J]. Aquaculture, 1990, 89(3–4): 287–299.
- [21] Lou Q M, Wang Y M, Liu X F, et al. Analysis of fatty acid composition and mass spectrometry characterization of polyunsaturated fatty acids in *Euphausia superba*[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2011, 18(4): 929–935. [楼乔明, 王玉明, 刘小芳, 等. 南极磷虾脂肪酸组成及多不饱和脂肪酸质谱特征分析[J]. 中国水产科学, 2011, 18(4): 929–935.]
- [22] Brown Jr A, Mcvey J P, Scott B M, et al. Preliminary results on the maturation and spawning of *Penaeus stylirostris* under controlled laboratory conditions[J]. World Aquacult Soc, 1980, 11(1–4): 488–499.
- [23] Wu C, Lin Q W, Zhang L L, et al. The influence of starvation and eyestalk ablation on the development of gonad and biochemical composition in hemolymph of *Marsupenaeus japonicus* broodstock[J]. Journal of Xiamen University: Natural Science, 2009, 48(5): 750–755. [吴超, 林琼武, 张黎黎, 等. 饥饿和切除眼柄对日本囊对虾亲虾性腺发育及血淋巴生化成分含量的影响[J]. 厦门大学学报: 自然科学版, 2009, 48(5): 750–755.]
- [24] Teshima S, Kanazawa A. Variation in lipid composition during the ovarian maturation of the prawn[J]. Bull Jpn Soc Sci Fish, 1983, 49(6): 957–962.

A comparative study on growth and gonadal development of *Litopenaeus vannamei* broodstock fed different formulated feeds

ZHANG Yuling^{1,2}, LUO Kun^{2,3}, KONG Jie^{2,3}, LIANG Mengqing^{2,3}, LUAN Sheng^{2,3}, CHEN Qiong^{1,2}, CAO Baoxiang^{2,3}

1. College of Marine Life, Ocean University of China, Qingdao 266003, China;

2. Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fisheries Resources, Ministry of Agriculture; Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;

3. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, China

Abstract: This experiment was conducted to evaluate different artificially formulated feeds on promoting gonadal development in *Litopenaeus vannamei* broodstock during the nutrient enrichment stage. Three kinds of formulated feeds, numbered diets no.1 (without krill meal), no.2 (10% krill meal), and no.3 (20% krill meal) were used as the experimental groups, with two replicates, and natural *Nereis* polychaete worm bait was used as the control group. The purpose of the experiment was to determine the appropriate formulated feed to enhance gonadal development in *L. vannamei* broodstock. The four treatment groups were fed the four different feeds for 60 d, and whole-body, hepatopancreatic, and gonad weights were determined. In addition, the fatty acid profiles of the four feeds and those of the hepatopancreas and gonads were analyzed in the four treatment groups. Fatty acid profiles of feed are important for gonadal development and reproduction in *L. vannamei* brood stock, as they can affect the hepatopancreatic and gonadal fatty acid profiles, as well as gonadal development. Eicosapentaenoic acid (EPA) docosahexaenoic acid (DHA), and arachidonic acid (AA) are three kinds of polyunsaturated fatty acids (PUFAs) that play significant roles in gonadal development. The results showed that female broodstock in the control group had the significantly highest weight gain rate, which was $(78.10 \pm 6.38)\%$ ($P < 0.05$), compared with that of the others. No difference in weight gain rate ($P > 0.05$) was observed between female broodstock in the three formulated feed groups. Weight gain rate of male broodstock was lower than that of females. Males in the control group had the highest weight gain rate, but no difference ($P > 0.05$) was observed in males fed diet no. 3, and no difference ($P > 0.05$) was observed between males fed diets no. 3 and no. 2. Fish fed diet no.2 had the lowest hepatopancreatic index at $(2.37 \pm 0.02)\%$; the hepatopancreatic index was not different ($P > 0.05$) from that in the control group, but was significantly different ($P < 0.05$) from that in the other two treatment groups. Fish fed diet no. 2 had a significantly higher ($P < 0.05$) gonadosomatic index (GSI) than that in the other groups, but no difference ($P > 0.05$) in GSI was observed between fish fed diet no.3 and the control group. The fatty acid profiles differed among the four feeds. More $\sum$ PUFA was detected in *Nereis* than those in the artificially formulated feeds, and EPA, DHA, and AA contents in *Nereis* were higher than those in the formulated feeds. Diet nos. 2 and 3 had significantly more ($P > 0.05$) $\sum$ PUFA as well as more EPA, DHA, and AA than those in diet no.1, indicating that the fatty acid profiles in diet nos. 2 and 3 were closer to those in *Nereis*. These results show that the fatty acid profiles in gonads were correlated with the fatty acid profiles in the brood stock feeds.

Key words: *Litopenaeus vannamei* broodstock; gonad development; artificial formula feed; Antarctic krill meal

Corresponding author: KONG Jie. E-mail: kongjie@ysfri.ac.cn