

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20230629001

http://www.yykxjz.cn/

朱相燕, 孟宪红, 代平, 孔杰, 栾生, 曹家旺, 谭建, 邢群. 零鱼粉饲料与高鱼粉饲料饲喂下凡纳对虾饲料利用效率相关性状的遗传评估. 渔业科学进展, 2024, 45(5): 174-182

ZHU X Y, MENG X H, DAI P, KONG J, LUAN S, CAO J W, TAN J, XING Q. Genetic evaluation of feed efficiency traits of Pacific white shrimp (*Penaeus vannamei*) fed zero- and high fishmeal diets. Progress in Fishery Sciences, 2024, 45(5): 174-182

零鱼粉饲料与高鱼粉饲料饲喂下凡纳对虾 饲料利用效率相关性状的遗传评估*

朱相燕^{1,2} 孟宪红^{2,3①} 代平^{2,3①} 孔杰^{2,3}
栾生^{2,3} 曹家旺² 谭建² 邢群⁴

(1. 浙江海洋大学水产学院 浙江 舟山 316022; 2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所
海水养殖生物育种与可持续产出全国重点实验室 山东 青岛 266071; 3. 青岛海洋科技中心海洋渔业科学与
食物产出过程功能实验室 山东 青岛 266237; 4. 邦普种业科技有限公司 山东 潍坊 261311)

摘要 为探讨选育零鱼粉需求凡纳对虾(*Penaeus vannamei*)品种的可能性, 解决目前鱼粉短缺、饲料成本居高不下的问题, 本研究在零鱼粉饲料(蛋白含量占38%)和高鱼粉饲料(鱼粉含量占25%, 蛋白含量占42%)饲喂条件下进行凡纳对虾饲料利用效率相关性状的遗传评估。选择30个家系进行40 d的单尾饲养实验, 结果显示, 饲喂高鱼粉饲料对虾的平均增重率(62.00%)和平均饲料效率比(124.00%)明显高于饲喂零鱼粉饲料(23.50%和49.40%)。对虾摄食量和增重率在零鱼粉饲料和高鱼粉饲料饲喂下的遗传力在0.458±0.140到0.699±0.155之间, 饲料效率比在零鱼粉饲料和高鱼粉饲料饲喂下的遗传力分别为0.186±0.098和0.341±0.110。由于没有剖分出共同环境效应, 遗传力都存在一定程度高估, 因此, 零鱼粉饲料饲喂下的饲料效率比的遗传变异并不高。摄食量和增重率在2种饲料间的遗传相关分别为0.580±0.171和0.676±0.155, 表示这2个性状存在中等的基因型与饲料互作效应。饲料效率比在2种饲料间的遗传相关仅为0.299±0.304, 表示该性状存在严重的基因型与饲料互作效应。综上结果来看, 使用零鱼粉饲料不利于凡纳对虾的养殖及选育工作的开展。

关键词 凡纳对虾; 饲料效率比; 遗传力; 遗传相关; 基因型与饲料互作

中图分类号 S968.22 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2024)05-0174-09

凡纳对虾(*Penaeus vannamei*)又称南美白对虾, 原产于南太平洋, 特别是厄瓜多尔沿岸, 是世界养殖产量与经济价值最高的虾类之一, 具有生长快、适应和抗病能力强、对食物营养要求低等特点。自1988年被

引进后, 凡纳对虾逐步成为我国对虾养殖产业中的主导品种, 2021年我国海、淡水养殖产量接近200万t(农业农村部渔业渔政管理局等, 2022)。

在凡纳对虾养殖中, 饲料成本要占到养殖总成本

* 国家重点研发计划(2021YFD1200805; 2022YFD2400202)、中国水产科学研究院黄海水产研究所基本科研业务费(20603022023001)、中国水产科学研究院科技创新团队项目(2020TD26)、现代农业产业技术体系专项(CARS-48)、海南省院士创新平台科研专项(YSPPTZX202104)和恒兴南美白对虾育种中心(2021E05032)共同资助。朱相燕, Email: 1289125901@qq.com

① 通信作者: 孟宪红, Email: mengxianhong@ysfri.ac.cn; 代平, 副研究员, Email: daiping@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2023-06-29, 收修改稿日期: 2023-07-29

的 40%~60% (Sookying *et al.*, 2011)。饲料中的蛋白质是对虾生长最重要的营养元素之一, 蛋白质水平过高或过低均会影响对虾的生长 (Samantaray *et al.*, 1997; Burford *et al.*, 2004; Xie *et al.*, 2020)。对虾饲料通常以鱼粉作为主要蛋白源, 一般凡纳对虾商业饲料中的鱼粉含量可高达 25% (Han *et al.*, 2018)。随着世界水产养殖业的快速发展, 鱼粉资源供不应求, 不断上涨的鱼粉价格使饲料价格及养殖成本增加, 因此, 低鱼粉甚至零鱼粉饲料养殖将成为对虾产业可持续发展的必经之路。用充足、便宜的植物蛋白源代替鱼粉, 借助选择育种的方法, 选育出零鱼粉需求或植物蛋白高效利用的对虾新品种, 可能是解决目前鱼粉短缺、饲料成本居高不下的一条有效途径。

改良对虾在零鱼粉饲料饲喂下的饲料利用效率性状是培育零鱼粉需求对虾新品种的关键所在。但目前还没有关于对虾在零鱼粉饲料饲喂下的饲料利用效率性状的评估报道, 不清楚对虾饲料利用效率在零鱼粉饲料饲喂下是否存在选育潜力, 也不清楚在零鱼粉饲料和高鱼粉饲料间是否存在基因型与饲料互作效应。因此, 本研究选择在零鱼粉饲料(鱼粉含量为 0, 蛋白含量占 38%)和高鱼粉饲料(鱼粉含量占 25%, 蛋白含量占 42%)饲喂条件下, 开展饲料利用效率相关性状的研究, 评估饲料利用效率相关性状(饲料效率比、摄食量和增重率)的遗传参数, 以及基因型与饲料互作效应, 为零鱼粉需求的对虾选育工作提供参考与依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

本研究选取了 30 个 2022 年构建的以生长速度为目标性状的凡纳对虾全同胞家系, 来自 30 个父本和 28 个母本, 其中包括 4 个母系半同胞家系。由于交配时间上的差异, 30 个家系间存在 16 d 的日龄差。所有包括家系构建在内的选育工作均在位于山东省潍坊市昌邑市的邦普种业科技有限公司凡纳对虾遗传育种中心完成。

1.2 实验设计

本研究分别以不含鱼粉的配合饲料(饲料蛋白含量占 38%)和鱼粉含量占 25%的配合饲料(饲料蛋白含量占 42%)对 30 个家系进行饲养实验。实验所用配合饲料的制作程序参见 Xu 等(2017)的研究。2 种饲料的原料与配方组成见表 1。

表 1 2 种饲料的配方与组成

Tab.1 Formulations and composition of the two diets

原料成分 Ingredients /(g/kg)	饲料 Feed	
	高鱼粉饲料 Diet with high fishmeal	零鱼粉饲料 Diet without fishmeal
鱼粉 Fishmeal	250	0
酵母 Yeast	50	50
花生粉 Peanut meal	112	200
豆粉 Soybean meal	190	340
高筋粉 Wheat gluten	225	225
大豆卵磷脂 Soy phospholipid	13	25
胆碱 Choline	5	5
鱼油 Fish oil	30	30
虾糠 Shrimp shell meal	100	100
磷酸二氢钙 $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	15	15
维生素预混料 Vitamin premix ^a	5	5
矿物质预混料 Mineral premix ^b	5	5
营养成分构成 Proximate composition/%		
粗蛋白 Crude protein	42	38
粗脂肪 Crude lipid	7.5	7.5

注: ^a 预混料为每千克饲料提供: 维生素 A 25 000 IU, 维生素 E 10 000 IU, α -生育酚醋酸盐 2 500 mg, 维生素 K₃ 120 mg, 维生素 B₁ 500 mg, 维生素 B₂ 750 mg, 维生素 B₆ 400 mg, 维生素 B₁₂ 25 mg, 烟酸 800 mg, 泛酸 2 000 mg, 叶酸 150 mg, 维生素 D₃ 2 000 IU, 肌醇 10 000 mg, 维生素 C 6 000 mg。

Note: ^b 每千克矿物质预混料: $\text{FeC}_6\text{H}_5\text{O}_7$ 22.86 g, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 7.94 g, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 11.05 g, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 1.55 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 35.85 g, Na_2SeO_3 0.02 g, KI 0.17 g。

^a The premix provided the following per kg of diets: Vitamin A 25 000 IU, V_E 10 000 IU, α -Tocophery acetate 2 500 mg, V_{K3} 120 mg, V_{B1} 500 mg, V_{B2} 750 mg, V_{B6} 400 mg, V_{B12} 25 mg, Nicotinic acid 800 mg, Pantothenic acid 2 000 mg, Folic acid 150 mg, V_{D3} 2 000 IU, Inositol 10 000 mg, V_C 6 000 mg。

^b Containing the following per kg of mineral premix: $\text{FeC}_6\text{H}_5\text{O}_7$ 22.86 g, $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 7.94 g, $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 11.05 g, $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 1.55 g, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 35.85 g, Na_2SeO_3 0.02 g, KI 0.17 g。

当 30 个家系个体平均体长达到 5 cm 左右时, 从每个家系随机选取 30 尾个体, 平均分成 2 组(每组 15 尾), 分别饲喂 2 种饲料, 共计 900 尾虾参与饲养实验, 每种饲料饲喂来自于 30 个家系的 450 尾虾。饲养实验在经改造的斑马鱼式循环水养殖系统进行, 该系统包含许多独立的养殖盒(尺寸: 200 mm×150 mm×100 mm)。每个养殖盒的底部配有特制滤网, 允许

粪便漏掉的同时会留住饲料。每组虾按随机区组设计放置到3套养殖系统,每个养殖盒放置1尾虾。

1.3 饲养实验

饲养实验在邦普种业科技有限公司凡纳对虾遗传育种中心进行。实验开始前1周,先将虾放入循环水养殖系统暂养。期间每天投喂3餐高鱼粉饲料。在饲养实验期间,为零鱼粉饲料组和高鱼粉饲料组的每尾虾单独准备一个塑料管用来盛放饲料。每天10:00、13:00和16:00各投喂一餐饲料,投喂量依据虾体大小和摄食情况调整,以30 min内可以全部吃完为准。为零鱼粉饲料组和高鱼粉饲料组的每尾虾单独准备一个塑料管收集未摄食的饲料,并统计整个饲养实验期间收集的每尾虾的总残余饲料。每天07:30检查所有对虾养殖盒,将残余的饲料收集到对应的塑料管,然后放入烘箱烘干至恒重。每天早晚各换水1次,换水量在80%以上,水温维持在(27.0±0.8)℃,盐度在30左右。每天及时捞出蜕皮。

饲养实验于2022年10月21日开始,到2022年11月29日结束,共持续40 d。在实验开始时称量每尾对虾的体重(W_0)及初始饲料重量(F_0)。实验结束后,共收集859尾个体,称量每尾虾的体重(W_t)、剩余饲料重量(F_t)及总残余饲料重量(F_r)。由于此时只有一小部分成虾能够确定性别,因此未统计性别信息。

1.4 数据统计与分析

1.4.1 表型性状统计 本研究统计了个体摄食量(feed intake, FI)、增重率(weight gain rate, WGR)和饲料效率比(feed efficiency ratio, FER)3个性状,各性状计算公式如下:

$$\text{摄食量(FI)} = F_0 - F_t - F_r \quad (1)$$

$$\text{增重率(WGR)} = (W_t - W_0) / W_0 \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{饲料效率比(FER)} = (W_t - W_0) / \text{FI} \times 100\% \quad (3)$$

式中, F_r 为整个饲养实验期间收集的每尾虾的总残余饲料重量(以干重计), F_0 和 F_t 分别为每尾虾的初始饲料重量和剩余饲料重量, W_0 和 W_t 分别为每尾虾的初始体重和终末体重。

借助Kolmogorov-Smirnov检验分析对虾的摄食量、增重率和饲料效率比表型是否符合正态分布。借助 T 检验(双尾)判断对虾摄食量、增重率和饲料效率比在2种饲料间是否存在显著差异, $P < 0.05$ 表示差异显著。上述分析均利用SPSS 19.0软件完成。

1.4.2 遗传力估计 建立混合线性模型,利用ASReml 4.1软件中的平均信息极大似然法(average information restricted maximum likelihood, AIREML)

估计凡纳对虾摄食量、增重率和饲料效率比这3个性状在2种饲料饲喂下的方差组分。育种分析模型为单性状动物模型:

$$Y_{ij} = \mu + \text{Tank}_i + b \times \text{IBW}_j + a_j + e_{ij} \quad (\text{模型 1})$$

式中, Y_{ij} 是第 j 尾虾的表型观测值, μ 是表型平均值, Tank_i 是第 i 个养殖系统的固定效应, IBW_j 是第 j 尾虾的初始体重(协变量), b 是回归系数, a_j 是第 j 尾虾表型的加性遗传效应, e_{ij} 是第 j 尾虾表型的随机残差。当模型中包含共同环境效应(家系效应)时,程序运行结果无法收敛,因此,所有后续用到的模型中都不包含共同环境效应。

表型方差(σ_p^2)是加性遗传方差(σ_a^2)与残差(σ_e^2)之和。各性状的遗传力计算公式: $h^2 = \sigma_a^2 / \sigma_p^2$ 。利用两性状动物模型估计同一饲料饲喂下不同性状间的遗传相关,以及各性状在2种饲料间的遗传相关,所用模型中的效应与模型1完全一致。参照Ponzoni等(2008)的研究,根据各性状在饲料间的遗传相关大小来判断基因型与饲料互作程度,分别以0.5、0.7和0.9三个值表示互作效应严重、中等和不显著。利用Z-score来检验不同性状的遗传力、遗传相关间差异是否显著。

2 结果

2.1 2种饲料饲喂下的性状表现

凡纳对虾在2种饲料饲喂下的摄食量、增重率和饲料效率比的描述性统计见表2。零鱼粉饲料饲喂下对虾平均摄食量为7.28 g,显著高于高鱼粉饲料(7.09 g) ($P < 0.01$),而其平均饲料效率比(23.50%)和平均增重率(49.40%)都显著低于高鱼粉饲料(62.00%和124.00%) ($P < 0.001$)。零鱼粉饲料和高鱼粉饲料饲喂下对虾的摄食量变异系数接近,而零鱼粉饲料饲喂下的饲料效率比和增重率的变异系数均明显高于高鱼粉饲料,表明在零鱼粉饲料饲喂下对虾饲料利用效率和增重率具有更大的表型变异。

如图1所示,30个家系在高鱼粉饲料饲喂下的平均饲料效率比在35.31%~77.30%之间,在零鱼粉饲料饲喂下的平均饲料效率比在12.64%~32.35%之间,表明不同家系的平均饲料效率比在高鱼粉饲料饲喂下的变异更大,且所有家系在高鱼粉饲料饲喂下的平均饲料效率比显著高于零鱼粉饲料($P < 0.05$)。如图2所示,30个家系在高鱼粉饲料饲喂下的平均增重率在34.51%~217.64%之间,在零鱼粉饲料饲喂下的平

均增重率在 19.19%~97.85%之间, 表明家系平均增重率在高鱼粉饲料饲喂下的变异也更大, 而且较饲料效

率比更加突出。有 27 个家系在高鱼粉饲料饲喂下的平均增重率显著高于零鱼粉饲料($P<0.05$)。

表 2 2 种饲料饲喂下凡纳对虾摄食量、饲料效率比和增重率的描述性统计

Tab.2 Descriptive statistics of feed intake, feed efficiency ratio and weight gain rate of *P. vannamei* fed with two kinds of diets

饲料 Feed	性状 Trait	平均值 Mean	最大值 Maximum	最小值 Minimum	标准偏差 Standard deviation	变异系数 Coefficient variation/%
零鱼粉饲料 Diet without fishmeal	摄食量 Feed intake/g	7.28	10.20	4.67	0.80	11.00
	饲料效率比 Feed efficiency ratio/%	23.50	107.80	3.00	13.50	57.40
	增重率 Weight gain rate/%	49.40	242.00	4.00	36.90	74.70
高鱼粉饲料 Diet with high fishmeal	摄食量 Feed intake/g	7.09	9.85	4.39	0.86	12.10
	饲料效率比 Feed efficiency ratio/%	62.00	141.40	5.10	18.90	30.50
	增重率 Weight gain rate/%	124.00	423.10	6.90	65.70	53.00

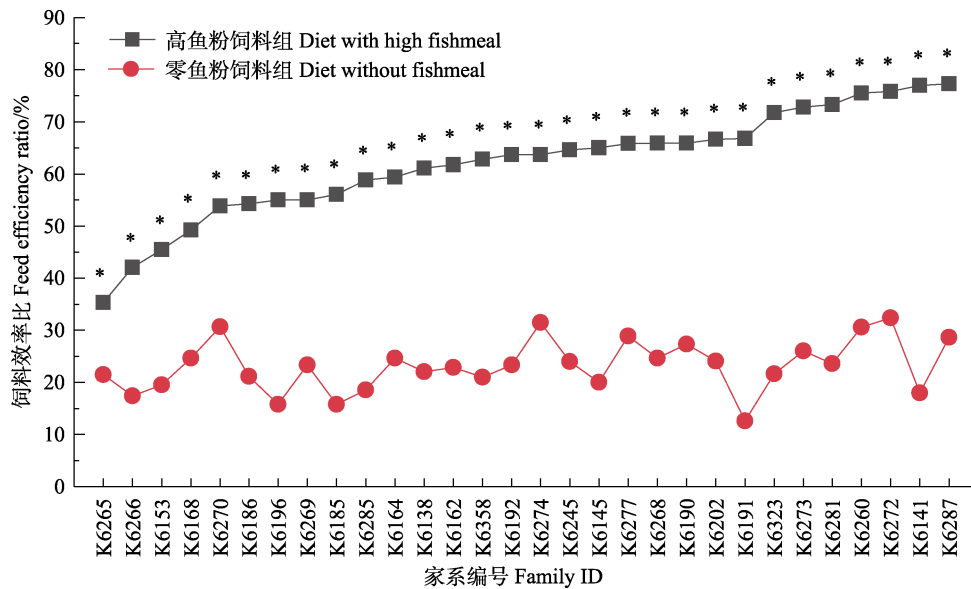


图 1 30 个家系在 2 种饲料饲喂下的平均饲料效率比

Fig.1 Average feed efficiency ratio of 30 families fed with two kinds of diets

*表示 2 种饲料饲喂下存在显著差异($P<0.05$), 下同。

The asterisk indicates a significant difference between two kinds of diets ($P<0.05$), and the same below.

2.2 2 种饲料饲喂下的性状遗传力

摄食量、饲料效率比和增重率这 3 个性状在 2 种饲料饲喂下的方差组分和遗传力见表 3。对虾摄食量在零鱼粉饲料饲喂下的遗传力为 0.699 ± 0.155 , 在高鱼粉饲料饲喂下的遗传力为 0.556 ± 0.139 ; 增重率在零鱼粉饲料饲喂下的遗传力为 0.458 ± 0.140 , 在高鱼粉饲料饲喂下的遗传力为 0.667 ± 0.146 , 都属于高等遗传力。但不同饲料间和不同性状间的遗传力差异都不显著($P>0.05$)。饲料效率比在零鱼粉饲料和高鱼粉饲料饲

喂下的遗传力分别为 0.186 ± 0.098 和 0.341 ± 0.110 , 二者间的差异也不显著($P>0.05$), 皆属于中等遗传力。

2.3 性状间相关分析

2 种饲料饲喂下各性状间的表型相关和遗传相关见表 4。无论哪种饲料, 摄食量、增重率和饲料效率比之间的遗传相关都达到中高等水平[(0.580 ± 0.188)~(0.945 ± 0.040)], 尤其是零鱼粉饲料饲喂下增重率与饲料效率比之间的遗传相关高达 0.9 以上, 性状间的遗传相关在 2 种饲料饲喂下并无显著性差异($P>0.05$)。

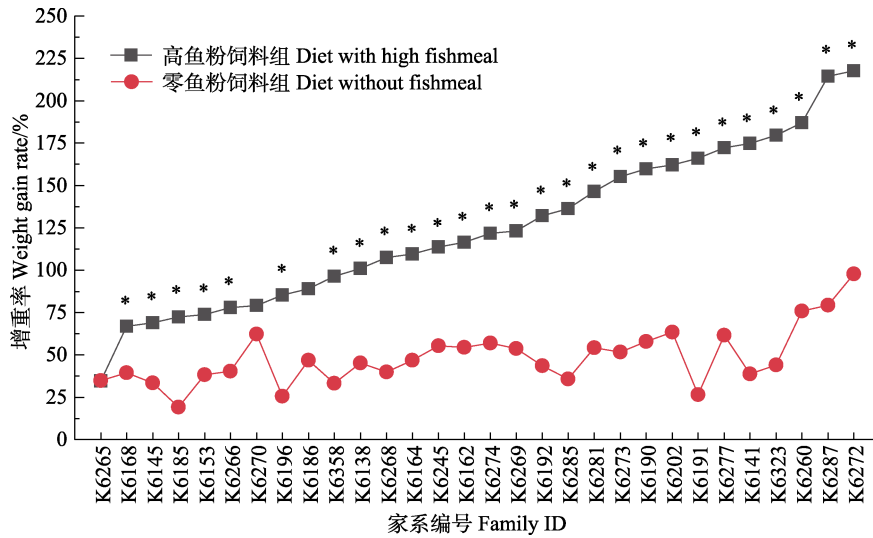


图 2 30 个家系在 2 种饲料饲喂下的平均增重率
Fig.2 Average weight gain rate of 30 families fed with two kinds of diets

表 3 摄食量、饲料效率比和增重率在 2 种饲料饲喂下的方差组分和遗传力

Tab.3 Variance components and heritability of feed intake, feed efficiency ratio and weight gain rate fed with two kinds of diets

饲料 Feed	性状 Trait	方差组分 Variance components			遗传力 Heritability
		σ_p^2	σ_a^2	σ_e^2	
零鱼粉饲料 Diet without fishmeal	摄食量 Feed intake/g	0.499±0.061	0.348±0.114	0.150±0.063	0.699±0.155
	饲料效率比 Feed efficiency ratio/%	0.017±0.001	0.003±0.002	0.014±0.002	0.186±0.098
	增重率 Weight gain rate/%	0.106±0.011	0.049±0.018	0.057±0.012	0.458±0.140
高鱼粉饲料 Diet with high fishmeal	摄食量 Feed intake/g	0.492±0.051	0.273±0.092	0.218±0.054	0.556±0.139
	饲料效率比 Feed efficiency ratio/%	0.030±0.003	0.010±0.004	0.020±0.003	0.341±0.110
	增重率 Weight gain rate/%	0.216±0.025	0.144±0.046	0.072±0.025	0.667±0.146

注: σ_p^2 为表型方差; σ_a^2 为加性遗传方差; σ_e^2 为残差方差。

Note: σ_p^2 is phenotypic variance; σ_a^2 is additive genetic variance; σ_e^2 is the residual variance.

表 4 2 种饲料饲喂下性状间的表型相关和遗传相关

Tab.4 The phenotypic and genetic correlations between traits fed with two kinds of diets

饲料 Feed	相关 Correlation	性状 Trait		
		增重率-摄食量	增重率-饲料效率比	饲料效率比-摄食量
		WGR-FI	WGR-FER	FER-FI
零鱼粉饲料 Diet without fishmeal	表型相关 Phenotypic correlation	0.314±0.071	0.895±0.012	0.169±0.068
	遗传相关 Genetic correlation	0.731±0.130	0.945±0.040	0.786±0.148
高鱼粉饲料 Diet with high fishmeal	表型相关 Phenotypic correlation	0.337±0.066	0.683±0.035	0.124±0.066
	遗传相关 Genetic correlation	0.621±0.152	0.728±0.123	0.580±0.188

2.4 基因型与饲料交互效应分析

同一性状在 2 种饲料间的遗传相关和表型相关见表 5。其中, 摄食量和增重率在 2 种饲料间的遗传

相关分别为 0.580±0.171 和 0.676±0.155, 表明这 2 个性状存在中等的基因型与饲料交互效应。饲料效率比在 2 种饲料间的遗传相关仅为 0.299±0.304, 表明饲料效率比存在严重的基因型与饲料交互效应。

表 5 同一性状在 2 种饲料间的表型相关和遗传相关
Tab.5 The phenotypic and genetic correlations of the same trait between two kinds of diets

相关 Correlation	性状 Trait		
	摄食量 FI	饲料效率比 FER	增重率 WGR
表型相关 Phenotypic correlation	0.362±0.140	0.075±0.080	0.373±0.128
遗传相关 Genetic correlation	0.580±0.171	0.299±0.304	0.676±0.155

3 讨论

3.1 不同鱼粉含量饲料饲喂下的性状表现

经过 40 d 的饲养实验, 饲喂高鱼粉饲料的对虾相比饲喂零鱼粉饲料, 平均增重率提高了 151.01%, 平均饲料效率比提高了 163.83%, 而平均摄食量降低了 2.61%。由于 2 个饲料组的对虾个体都是按随机区组设计放置到 3 套养殖系统, 所以养殖环境对结果的影响可以忽略不计, 造成此差异的原因主要是饲料中的蛋白种类或蛋白含量。有研究表明, 海水养殖条件下的凡纳对虾饲料蛋白含量在 36% 左右就可以满足对虾正常生长需求, 随着饲料蛋白含量的提高不会带来明显的生长促进效果(刘立鹤等, 2003; 苟妮娜等, 2019)。结合本研究结果, 造成饲料效率比和增重率在 2 种饲料饲喂下出现显著差异的原因主要应该归结为植物蛋白替代鱼粉。这与前期一些研究报道的结果一致(何树青, 2022; Yao *et al*, 2020; Ray *et al*, 2021), 过量或完全替代鱼粉则容易导致对虾生长性能和饲料利用效率降低。Dai 等(2022)前期比较了凡纳对虾在饲喂低鱼粉、低蛋白饲料(蛋白质含量占 35%、鱼粉含量占 9%)和高鱼粉、高蛋白饲料(蛋白质含量占 42%、鱼粉含量占 25%)间的生长表现, 发现高鱼粉、高蛋白饲料饲喂下的对虾生长速度更快, 但差异并不大, 关于摄食量的结果却相反, 大多数家系在高鱼粉、高蛋白饲料饲喂下的日摄食量更高, 这可能与不同的养殖、投喂方式以及鱼粉含量有关。

3.2 饲料效率比的遗传力

本研究中, 零鱼粉饲料和高鱼粉饲料饲喂条件下凡纳对虾饲料效率比的遗传力估计值分别为 0.186±0.098 和 0.341±0.110, 二者皆低于基于 3 种矩阵(A、G 和 H 矩阵)估计的高鱼粉、高蛋白饲料饲喂下凡纳对虾饲料效率比的遗传力(0.476~0.501) (Dai *et al*,

2020)。但根据 Dai 等(2020)的研究, 当模型中包含共同环境效应时, 饲料效率比遗传力估计值为 0.361~0.388。由于本实验设计中缺乏半同胞家系, 家系间亲缘关系较薄弱, 实验前家系独立养殖产生的共同环境效应难以被剖分出来, 会导致本研究中的遗传力估计结果偏高。在无法剖分共同环境效应的情况下, Dai 等(2017a)利用 A 矩阵和 H 矩阵估计中国对虾(*Fenneropenaeus chinensis*)饲料效率比的遗传力为 0.253~0.259, 仅属于中等水平。鱼类中多采用饲料转化率(饲料效率比的倒数)作为饲料利用效率指标, 报道的饲料转化率遗传力都较低, 如尼罗罗非鱼(*Oreochromis niloticus*)饲料转化率遗传力为 0.10 (De Verdal *et al*, 2022), 虹鳟(*Oncorhynchus mykiss*)饲料转化率遗传力为 0.07 (Kause *et al*, 2016)。综合这些研究结果来看, 包括鱼虾在内的水产动物的饲料效率比的遗传力大多属于中低水平。再考虑到本研究中的饲料效率比的遗传力中包含未剖分出来的共同环境效应, 实际遗传力要更低一些, 因此, 判断该性状的遗传变异相对有限。

3.3 日摄食量和增重率的遗传力

凡纳对虾摄食量在零鱼粉饲料和高鱼粉饲料饲喂下的遗传力分别为 0.699±0.155 和 0.556±0.139, 与 Dai 等(2017b)报道的凡纳对虾在高鱼粉、高蛋白饲料饲喂下的日摄食量遗传力(0.664~0.696)一致, 都属于高遗传力, 且高于大多数有报道的鱼类摄食量的遗传力估计值(0.112~0.45)(Quinton *et al*, 2007; De Verdal *et al*, 2018, 2022; Scholtens *et al*, 2023)。本研究中的生长性状(增重率)在零鱼粉饲料和高鱼粉饲料饲喂下的遗传力分别为 0.458±0.140 和 0.667±0.146, 这与 Dai 等(2022)报道的低鱼粉、低蛋白和高鱼粉、高蛋白饲料饲喂下体重的遗传力(0.585~0.671)水平相当。尽管本研究的遗传力估计值因包含了未剖分出来的共同环境效应会偏高一些, 但仍表明生长性状在零鱼粉饲料和高鱼粉饲料饲喂下都有一定的选育潜力。

3.4 性状间的遗传相关

摄食量、增重率和饲料效率比间的遗传相关, 无论在零鱼粉饲料饲喂下 [(0.731±0.130)~(0.945±0.040)], 还是在高鱼粉饲料饲喂下 [(0.580±0.188)~(0.728±0.123)], 都达到中高等水平。Dai 等(2017b)的研究显示, 高鱼粉、高蛋白饲料饲喂下凡纳对虾的平均日增重和饲料效率比间的遗传相关也达到了中高等水平(0.624~0.851), 而日摄食量和饲料效率比间却呈高度负相关(-0.709~-0.765)。Dai 等(2017a)报道

的中国对虾饲料效率比和平均日增重间的遗传相关也很高(0.895)。对于其他水产动物,尼罗罗非鱼的饲料转化率与摄食量的遗传相关(0.67)也相对较高,而饲料转化率与增重间仅存在弱遗传相关(-0.07) (De Verdal *et al.*, 2018)。上述结果提示,可以通过选择生长性状来间接提高饲料效率比。

3.5 基因型与饲料互作效应

根据 Eknath 等(2007)的研究,若一个性状在不同环境间的遗传相关越小,则表明基因型与环境互作效应越大。在本研究中,将饲料视为一种环境因素,增重率和摄食量在 2 种饲料间的遗传相关分别为 0.676 ± 0.155 和 0.580 ± 0.171 , 表明这 2 个性状存在中等程度的基因型与饲料互作效应。Dai 等(2022)估计了凡纳对虾体重在低鱼粉、低蛋白饲料与高鱼粉、高蛋白饲料间的遗传相关高达 0.928, 表明没有明显的基因型与饲料互作效应。在鱼类中,Quinton 等(2007)发现白鲑(*Coregonus*)在全鱼粉饲料和低鱼粉高豆粕饲料饲养条件下的日增重和日摄食量也不存在明显基因型与饲料互作效应(遗传相关 >0.9)。由此可见,饲料中是否含有鱼粉对动物生长和摄食性状造成的基因型与饲料互作效应要比饲料中鱼粉含量高低导致的互作效应更加严重。本研究还发现,相比生长和摄食性状,饲料效率比存在严重的基因型与饲料互作效应,这表明饲料中是否含有鱼粉会严重影响凡纳对虾对饲料的利用效率,不同基因型的对虾在鱼粉需求上差异很大。了解了饲料利用效率性状的基因型与饲料互作效应,可有效地指导不同鱼粉需求对虾良种选育目标与方案的制定。

4 结论

本研究通过比较零鱼粉饲料与高鱼粉饲料饲养下凡纳对虾的饲料利用效率相关性状的表现,发现零鱼粉饲料饲喂下的对虾饲料效率比和平均增重率显著低于高鱼粉饲料,表明使用零鱼粉饲料并不利于凡纳对虾的养殖。考虑到本研究中的饲料效率比的遗传力存在一定程度高估,因此,零鱼粉饲料饲喂下的饲料效率比的遗传变异并不高,理论上选育潜力有限。后续有必要适当提高饲料中的鱼粉含量,尝试评估低鱼粉低蛋白条件下饲料利用效率性状的遗传参数及选育潜力。

参 考 文 献

Bureau of Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs,

National Fisheries Technology Extension Center, China Society of Fisheries. China fishery statistical yearbook 2022. Beijing: China Agriculture Press, 2022 [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. 2022 中国渔业统计年鉴. 北京: 中国农业出版社, 2022]

- BURFORD M A, SMITH D M, TABRETT S J, *et al.* The effect of dietary protein on the growth and survival of the shrimp, *Penaeus monodon* in outdoor tanks. *Aquaculture Nutrition*, 2004, 10(1): 15–23
- DAI P, KONG J, LIU J, *et al.* Evaluation of the utility of genomic information to improve genetic evaluation of feed efficiency traits of the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Aquaculture*, 2020, 527: 735421
- DAI P, LUAN S, LU X, *et al.* Genetic assessment of residual feed intake as a feed efficiency trait in the Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Genetics Selection Evolution*, 2017b, 49(1): 1–9
- DAI P, LUAN S, LU X, *et al.* Genetic evaluation of feed efficiency in the breeding population of *Fenneropenaeus chinensis* “Huanghai No. 2” using phenotypic, pedigree and genomic information. *Aquaculture International*, 2017a, 25: 2189–2200
- DAI P, LUAN S, SUI J, *et al.* Insight into genetic potential for growth and survival of the Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) in the context of low-protein and low-fishmeal diet use. *Aquaculture Research*, 2022, 53(9): 3337–3345
- DE VERDAL H, HAFFRAY P, DOUCHET V, *et al.* Impact of a divergent selective breeding programme on individual feed conversion ratio in Nile tilapia *Oreochromis niloticus* measured in groups by video-recording. *Aquaculture*, 2022, 548: 737572
- DE VERDAL H, VANDEPUTTE M, MEKKAWY W, *et al.* Quantifying the genetic parameters of feed efficiency in juvenile Nile tilapia *Oreochromis niloticus*. *BMC Genetics*, 2018, 19: 1–10
- EKNATH A E, BENTSEN H B, PONZONI R W, *et al.* Genetic improvement of farmed tilapias: Composition and genetic parameters of a synthetic base population of *Oreochromis niloticus* for selective breeding. *Aquaculture*, 2007, 273(1): 1–14
- GOU N N, ZHANG J L. The comparison study on feed protein demand of *Litopenaeus vannamei* cultured in seawater and desalinated water. *Genomics and Applied Biology*, 2019, 38(3): 1039–1047 [苟妮娜, 张建禄. 海水和淡化水养殖凡纳滨对虾饲料蛋白需求量的比较研究. *基因组学与应用生物学*, 2019, 38(3): 1039–1047]
- HAN D, SHAN X J, ZHANG W B, *et al.* A revisit to fish-meal usage and associated consequences in Chinese aquaculture. *Reviews in Aquaculture*, 2018, 10(2): 493–507
- HE S Q. Effects of three protein sources replacing fish meal on

- growth, nonspecific immunity, and protein synthesis for *Litopenaeus vannamei*. Master's Thesis of Guangdong Ocean University, 2022 [何树青. 三种蛋白源替代鱼粉对凡纳滨对虾生长、非特异性免疫力及蛋白合成的影响. 广东海洋大学硕士研究生学位论文, 2022]
- KAUSE A, KIESSLING A, MARTIN S A M, *et al.* Genetic improvement of feed conversion ratio via indirect selection against lipid deposition in farmed rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum). *British Journal of Nutrition*, 2016, 116(9): 1656–1665
- LIU L H, ZHENG S X, ZHENG X C, *et al.* Effects of optimal protein requirement and dietary protein level on body components of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Reservoir Fisheries*, 2003, 23(2): 11–13 [刘立鹤, 郑石轩, 郑献昌, 等. 南美白对虾最适蛋白需要量及饲料蛋白水平对体组分的影响. *水利渔业*, 2003, 23(2): 11–13]
- PONZONI R W, NGUYEN N H, KHAW H L, *et al.* Accounting for genotype by environment interaction in economic appraisal of genetic improvement programs in common carp *Cyprinus carpio*. *Aquaculture*, 2008, 285(1/2/3/4): 47–55
- QUINTON C D, KAUSE A, KOSKELA J, *et al.* Breeding salmonids for feed efficiency in current fishmeal and future plant-based diet environments. *Genetics Selection Evolution*, 2007, 39(4): 431–446
- RAY G W, YANG Q H, TAN B P, *et al.* Effects of replacing fishmeal with dietary wheat gluten meal (WGM) on growth, serum biochemical indices, and antioxidative functions, gut microbiota, histology and disease resistance for juvenile shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Animal Feed Science and Technology*, 2021, 281: 115090
- SAMANTARAY K, MOHANTY S S. Interactions of dietary levels of protein and energy on fingerling snake head, *Channa striata*. *Aquaculture*, 1997, 156(3/4): 241–249
- SCHOLTENS M, DODDS K, WALKER S, *et al.* Opportunities for improving feed efficiency and spinal health in New Zealand farmed Chinook salmon (*Oncorhynchus tshawytscha*) using genomic information. *Aquaculture*, 2023, 563: 738936
- SOOKYING D, DAVU D A. Pond production of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) fed high levels of soybean meal in various combination. *Aquaculture*, 2011, 319(1/2): 141–149
- XIE S W, WEI D, FANG W P, *et al.* Survival and protein synthesis of post-larval white shrimp, *Litopenaeus vannamei* were affected by dietary protein level. *Animal Feed Science and Technology*, 2020, 263: 114462
- XU H, ZHANG Y, LUO K, *et al.* Arachidonic acid in diets for early maturation stages enhances the final reproductive performances of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture*, 2017, 479: 556–563
- YAO W X, ZHANG C Y, LI X Q, *et al.* The replacement of fish meal with fermented soya bean meal or soya bean meal in the diet of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*). *Aquaculture Research*, 2020, 51(6): 2400–2409

(编辑 冯小花)

Genetic Evaluation of Feed Efficiency Traits of Pacific White Shrimp (*Penaeus vannamei*) Fed Zero- and High Fishmeal Diets

ZHU Xiangyan^{1,2}, MENG Xianhong^{2,3①}, DAI Ping^{2,3①}, KONG Jie^{2,3},
LUAN Sheng^{2,3}, CAO Jiawang², TAN Jian², XING Qun⁴

(1. Fisheries College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. State Key Laboratory of Mariculture Biobreeding and Sustainable Goods, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China; 3. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Qingdao Marine Science and Technology Center, Qingdao 266237, China; 4. BLUP Aquabreed Co., Ltd., Weifang 261311, China)

Abstract Pacific white shrimp *Penaeus vannamei*, as one of the most productive and economically valuable shrimp species in the world, have many favorable characteristics, such as a short growth cycle, strong adaptability and disease resistance, and a low nutritional demand. They are omnivorous animals whose diet mainly consists of animal-derived food. Conventional feed used in their culture contains fishmeal as the main protein source. Feed costs account for 40%~60% of their production costs. Therefore,

① Corresponding author: MENG Xianhong, Email: mengxianhong@ysfri.ac.cn; DAI Ping, Email: daiping@ysfri.ac.cn

breeding *P. vannamei* strains without demand for fishmeal would be an effective way to address the issues of fishmeal shortage and high feed costs. Improving utilization efficiency for diets without fishmeal is key to breeding such *P. vannamei* strains. In this study, genetic parameters for feed efficiency traits (feed efficiency ratio, feed intake, and weight gain) and genotype by environment interaction were evaluated using two diets, one without fishmeal (38% protein) and one with 25% fishmeal (42% protein).

Thirty families of *P. vannamei* were selected for a 40-day feeding experiment. A total of 900 shrimp (30 animals per family) were selected. Fifteen animals per family were fed a zero-fishmeal diet, and the other 15 animals were fed a high fishmeal diet. The feed intake and body weight of all animals were measured for calculating the feed efficiency ratio and weight gain. The variance components for these traits were estimated using a univariate model and an average information restricted maximum likelihood algorithm, and genetic (phenotypic) correlations between traits were estimated using bivariate analysis.

The results showed that shrimp fed a high fishmeal diet exhibited a significantly higher mean weight gain (62.00%) and feed efficiency ratio (124.00%) than those fed a zero-fishmeal diet, which had a mean weight gain of 23.50% and feed efficiency ratio of 49.40%. There was a small difference in the mean feed intake between shrimp fed a high fishmeal diet (7.09 g) and those fed a zero-fishmeal diet (7.28 g).

The heritability estimates for feed intake of shrimp fed zero- and high fishmeal diets were 0.699 ± 0.155 and 0.556 ± 0.139 , respectively. For weight gain, the heritability estimates of shrimp fed zero- and high fishmeal diets were 0.458 ± 0.140 and 0.667 ± 0.146 , respectively, which were high. However, the differences between diets and between traits were not statistically significant ($P > 0.05$). The heritability estimates for feed efficiency ratio of shrimp fed zero- and high fishmeal diets were 0.186 ± 0.098 and 0.341 ± 0.110 , respectively, which were low to medium. The differences in feed efficiency ratio between diets was not statistically significant ($P > 0.05$). All the above heritability estimates were overestimated, to some extent, because common environmental effects were not estimated. Therefore, there was not much genetic variation in feed efficiency ratio in shrimp fed a zero-fishmeal diet, suggesting limited potential in selection breeding of this trait.

Regardless of diet, genetic correlations among feed intake, weight gain, and feed efficiency ratio were moderate to high (0.580 ± 0.188 to 0.945 ± 0.040). Genetic correlations between diets were 0.580 ± 0.171 and 0.676 ± 0.155 for feed intake and weight gain, respectively, indicating that these two traits had moderate genotype by diet interactions. The genetic correlation between diets was only 0.299 ± 0.304 for feed efficiency ratio, which indicates a serious genotype by diet interaction. According to the above results, use of a zero-fishmeal diet is not good for the culture and breeding of *P. vannamei*. In the future, fishmeal content in the diet may be appropriately increased, and genetic parameters and potential feed efficiency traits should be evaluated in low fishmeal diets.

Key words *Penaeus vannamei*; Feed efficiency ratio; Heritability; Genetic correlation; Genotype by feed interaction