

## 不同饵料搭配对中国明对虾生长和饵料转化效率的影响

黄国强, 董双林, 王芳

(中国海洋大学海水养殖重点实验室, 山东青岛 266003)

**摘要:** 采用沙丁鱼肌肉 (FF)、鹰爪虾肌肉 (SF)、菲律宾蛤仔足肌 (CF)、沙蚕 (PW) 和配合饲料 (FD) 5种饵料, 设计了 CF+PW、CF+FD、PW+FD、CF+FD+PW、FF+FD+PW+FD、FF+SF+CF+PW+FD 共6种饵料搭配投喂模式, 研究了不同饵料搭配对中国明对虾的生长和饵料转化效率的影响。中国明对虾摄食混合饵料后的生长都比除 PW 处理外的4种单种饵料投喂处理快, CF+PW 处理的对虾在实验结束时的体重、增重率最大。混合投喂处理的饵料转化效率均高于除 PW 外的所有单种饵料投喂处理, 所有混合投喂处理的实际饵料转化效率都比预测值高, 并且除了 PW+FD 和 CF+FD+PW 两个处理的实际值与预测值差异不显著外, 其它混合处理的饵料转化效率实际值都显著高于预测值。文中还对不同饵料搭配的优势对对虾饵料选择性的影响及产生这些优势的原因进行了探讨。

**关键词:** 饵料搭配; 中国明对虾; 生长; 饵料转化效率

**中图分类号:** Q178.1; S968.22      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1673-2227-(2005)05-0026-07

## Effects of different combinations of diets on the growth and food conversion efficiency of Chinese shrimp, *Fenneropenaeus chinensis*

HUANG Guo-qiang, DONG Shuang-lin, WANG Fang

(Mariculture Research Laboratory, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

**Abstract:** The five diets used in the experiment were: fish flesh (FF) —the flesh of sardine (*Sardinella zunasi*), which was got rid of head, scales, fins, bowels, and bones; shrimp flesh (SF) —the flesh of a small size shrimp (*Trachypenaeus curvirostris*), which was got rid of head and shell; clam foot (CF) —the foot of clam (*Ruditapes varigata*), which was cut from the clam; polychaete worm (PW) —*Neanthes japonica* worm; formulated diet (FD) —a commercial sold shrimp diet (Sea-Horse brand; producer: Fujian Mawei Unite Feed Ltd. Co., China; Ingredients: bean powder, fish powder, shrimp powder, compound vitamins, and compound minerals). Six different combinations of diets (CF+PW, CF+FD, PW+FD, CF+FD+PW, FF+FD+PW+FD, and FF+SF+CF+PW+FD) and five single diets (FF, SF, CF, PW, and FD) were designed to investigate their effects on the growth and food conversion efficiency (FCE) of Chinese shrimp, *Fenneropenaeus chinensis*. The shrimp fed with mixed diets grew faster than those fed with single diet except PW and the shrimp in CF+PW treatment was the highest in terms of final weight and weight gain. The food conversion efficiencies (FCE) in mixed diets treatments were higher than all single diet treatments except PW and also higher than the estimated food conversion efficiencies (eFCE). Besides this, all FCE of mixed diets treatments were significant higher than eFCE except that FCE of PW+FD and CF+FD+PW were higher than eFCE but not significant. The effects of the advantages of mixed diets treatments on dietary selection of shrimp and causation of the advantages were discussed.

收稿日期: 2005-07-08; 修回日期: 2005-08-09

资助项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (G19999012011); 国家“863”高技术研究发展项目 (2002AA648010)

作者简介: 黄国强 (1973-), 男, 博士, 讲师, 主要从事水产养殖生态学研究。E-mail: hgqhugh@yahoo.com.cn

**Key words:** combinations of diets; Chinese shrimp; *Fenneropenaeus chinensis*; growth; food conversion efficiency

在天然环境和养殖池塘中, 对虾摄食的饵料种类非常多, 食谱广泛<sup>[1-7]</sup>, 但同时对于某些饵料种类表现出明显的偏好, 在多种饵料同时存在时表现出明显的选择性<sup>[8,9]</sup>。以往的研究发现饵料密度、寻觅的难易、处理的难易等因素会影响动物对饵料的选择性<sup>[10-16]</sup>, 这种选择性部分或全部地受到摄食过程中获得的能量净值与处理食物消耗能量的比值最大化规律的支配<sup>[12,17,18]</sup>。在实验条件下, 不同饵料均过量同时提供时, 尽管对虾偏好某种饵料, 对虾也摄食其它饵料<sup>[8]</sup>。对虾的这种杂食性行为显然具有某些优势, 如 Chamberlain 和 Lawrence<sup>[20]</sup> (1981) 发现南美白对虾同时摄食鲑鱼、虾类、多毛纲动物和蛤肉时生长要比单独摄食其中任何一种饵料时生长要快。日本对虾同时摄食鳀鱼和蛤时生长比仅摄食其中一种饵料好<sup>[8]</sup>。对

虾杂食性可能具有的其它优点包括通过不同饵料的搭配来改善摄入食物的营养平衡和能量特征, 从而达到对饵料资源的节约和更有效利用。本实验以中国明对虾 *Fenneropenaeus chinensis* 为研究对象, 对这些可能的优越性进行探讨。

## 1 材料和方法

### 1.1 饵料的准备

实验用的 5 种饵料分别为沙丁鱼肌肉 (FF, 除去头、内脏、骨、鳞、鳍的鱼)、鹰爪虾肌肉 (SF, 除去头、壳、内脏)、菲律宾蛤仔足肌 (CF, 蛤蜊的斧足)、沙蚕 (PW, 日本刺沙蚕) 和配合饲料 (FD, 海马牌配合饲料)。每种饵料在投喂前都切成和配合饲料大小 (长 4 mm, 直径 2 mm 左右) 一致的小块。5 种饵料的营养和能量特征见表 1。

表 1 5 种饵料及混合摄入饵料的成分 (平均值 ± SE)

Tab. 1 Composition of five provided diets and ingested mixed diets (mean ± SE)

饵料种类 diets	水分/% moisture	蛋白质/% protein	脂肪/% lipid	能量/ kJ·g <sup>-1</sup> energy	能蛋比 (E/P) energy/protein	脂蛋比 (L/P) lipid/protein
FF	82.62 ± 1.50	91.41 ± 0.017 <sup>h</sup>	2.40 ± 0.14 <sup>a</sup>	22.61 ± 0.02 <sup>f</sup>	24.74 ± 0.21 <sup>a</sup>	0.026 ± 0.001 <sup>a</sup>
SF	88.25 ± 0.44	86.88 ± 0.08 <sup>e</sup>	3.84 ± 0.18 <sup>b</sup>	22.87 ± 0.04 <sup>e</sup>	26.32 ± 0.35 <sup>b</sup>	0.044 ± 0.001 <sup>b</sup>
CF	78.19 ± 0.77	66.49 ± 0.06 <sup>cd</sup>	4.31 ± 0.47 <sup>c</sup>	20.99 ± 0.09 <sup>cd</sup>	31.57 ± 0.48 <sup>de</sup>	0.065 ± 0.001 <sup>c</sup>
PW	75.66 ± 0.54	70.93 ± 0.11 <sup>f</sup>	11.00 ± 0.18 <sup>e</sup>	21.31 ± 0.10 <sup>c</sup>	30.04 ± 0.78 <sup>c</sup>	0.155 ± 0.011 <sup>ef</sup>
FD	8.00 ± 1.04	45.97 ± 0.05 <sup>a</sup>	9.16 ± 0.17 <sup>d</sup>	19.37 ± 0.03 <sup>a</sup>	42.12 ± 0.16 <sup>e</sup>	0.199 ± 0.006 <sup>c</sup>
CF + PW	.....	70.64 ± 0.04 <sup>f</sup>	10.53 ± 0.06 <sup>fe</sup>	21.29 ± 0.01 <sup>e</sup>	30.13 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.149 ± 0.001 <sup>d</sup>
CF + FD	.....	53.92 ± 1.41 <sup>b</sup>	7.28 ± 0.33 <sup>d</sup>	20.00 ± 0.11 <sup>b</sup>	37.14 ± 0.79 <sup>f</sup>	0.136 ± 0.010 <sup>f</sup>
PW + FD	.....	64.81 ± 0.73 <sup>c</sup>	10.53 ± 0.05 <sup>fe</sup>	20.83 ± 0.06 <sup>c</sup>	32.15 ± 0.23 <sup>c</sup>	0.162 ± 0.001 <sup>ef</sup>
CF + FD + PW	.....	67.92 ± 1.01 <sup>de</sup>	10.42 ± 0.16 <sup>f</sup>	21.08 ± 0.08 <sup>d</sup>	31.04 ± 0.35 <sup>cd</sup>	0.153 ± 0.002 <sup>ef</sup>
FF + CF + PW + FD	.....	67.75 ± 1.09 <sup>de</sup>	9.90 ± 0.32 <sup>c</sup>	21.04 ± 0.08 <sup>d</sup>	31.07 ± 0.37 <sup>cd</sup>	0.146 ± 0.005 <sup>de</sup>
FF + SF + CF + PW + FD	.....	68.92 ± 1.17 <sup>ef</sup>	9.45 ± 0.15 <sup>de</sup>	21.15 ± 0.09 <sup>de</sup>	30.70 ± 0.39 <sup>cd</sup>	0.137 ± 0.002 <sup>d</sup>

注: 同一列中未标有相同字母的数值相互之间存在显著差异。混合投喂处理的各项指标根据实际不同饵料摄入比例加权计算获得

Note: Values without same letter in the same column are different from each other. The values of mixed diet were weighed in accordance with the portion of each diet in total ingested diet.

### 1.2 实验养殖设施及条件

实验在中国海洋大学教育部海水养殖重点实验室进行。对虾按每个水族箱 4 尾的密度 (45 cm × 30 cm × 30 cm, 水体 35 L) 养殖, 室内温度用空调控制; 连续充气, 每 2 天换水 1/2, 所用海水用筛

绢过滤; 水族箱内溶氧保持在 5.5 mg·L<sup>-1</sup> 以上, 氨氮含量不高于 2.2 mg·L<sup>-1</sup>, 海水温度为 25 ± 0.5℃, 盐度为 30 ~ 32, pH 值为 7.8 ± 0.3; 光照周期为 14L : 10D。

### 1.3 实验用虾来源及驯化

实验所用对虾从山东省胶南市购买, 运回实验

室后分至水族箱内按实验条件进行为期7 d的驯化。驯化期间每天过量投饵2次(早上6:00和晚上6:00),投饵后2.5~3 h时间段内清除水族箱内的残饵和粪便。

#### 1.4 实验设计

驯化结束后,对虾禁食24 h,挑选规格一致的对虾用精确到0.1 mg的电子天平称重,每一水族箱内放入体重(湿重)为 $0.805 \pm 0.005$  g(平均值 $\pm$ SE)的对虾4尾。实验共持续30 d。实验共设11个处理,分别投喂不同的饵料,前5个处理分别投喂过量的沙丁鱼肉(FF)、虾肉(SF)、蛤蜊肉(CF)、沙蚕(PW)和配合饲料(FD),后6个处理的饵料组合分别为CF+PW、CF+FD、PW+FD、CF+FD+PW、FF+FD+PW+FD、FF+SF+CF+PW+FD,每一种都过量投喂,使每种饵料的剩余量达到投喂量的一半以上。每一处理设4个重复,共用44个水族箱,水族箱的排列采用完全随机化区组设计进行排列。

#### 1.5 样品的收集和测定

挑选实验用对虾的同时取对虾样品3个,每个样品8尾虾,分析对虾初始成分。每种饵料也分别随机取样3个,作为分析饵料成分的样品。每天投喂的饵料都精确称重,投喂后在2.5~3 h时间段内收集残饵,并对每种饵料进行溶失实验,用于校正最后收集的残饵的量。实验结束后,每个水族箱内的虾分别称量湿重,作为一个样品。收集的样品均用烘箱在65℃下烘干至恒重,计算对虾和饵料样品的水分含量。除残饵外,所有样品用凯氏定氮法测定氮含量并换算成粗蛋白质(P)含量(凯氏氮 $\times 6.25$ )。对虾和饵料的粗脂肪含量(L)用索氏抽提法测定。样品的灰份含量用马福炉在550℃下燃烧至恒重测得<sup>[21]</sup>。样品的能量值(GE)用PARR1281型卡路里计测定。每个样品测定3次。

#### 1.6 数据计算

对虾的增重率(WG, % 初始体重)和饵料转化效率(FCE, %)的计算公式分别如下:

$$WG = 100 \times (W_t - W_0) / W_0$$

$$FCE = 100 \times (W_t - W_0) / C$$

其中对虾体重为湿重(W, g),而饵料均为干重。 $W_t$ 为实验结束时对虾的体重, $W_0$ 为实验开始时对虾的体重, $T$ 为实验持续时间(d), $C$ 为摄食

量。

相应地,所有样品以干物质(D, g)、蛋白质(P, g)和能量(E, kJ)表示的特定生长率、增重率、饵料转化效率也按以上公式进行计算<sup>[22]</sup>。

饵料的能量蛋白比(GE/P,  $\text{kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ )、脂肪蛋白比(L/P)按如下公式进行计算:

$$GE/P = GE \div P$$

$$L/P = L \div P$$

在假设不同单种饵料对混合饵料的转化效率没有相互作用的前提下,预测混合饵料转化效率计算公式如下:

$$eFCE = \sum_{i=1}^5 FCE_i \times R_i$$

其中 $FCE_i$ 为单种饵料投喂时某种饵料的实际饵料转化效率, $R_i$ 表示相应饵料在总饵料摄入量中的比例。

#### 1.7 数据的统计分析

对数据的统计分析用SPSS 10.0进行。对数据进行了单因子方差分析和Duncan氏多重比较,以 $P < 0.05$ 作为差异显著的标准。

## 2 实验结果

### 2.1 中国明对虾的生长

实验结束时不同处理的中国明对虾在湿重、干重、蛋白质、能量等方面都存在显著差异,以FF处理最小,相应的湿重、干重、蛋白质、能量分别为0.993、0.189、0.134 g和3.31 kJ,CF+PW处理最大,相应的湿重、干重、蛋白质、能量分别为2.089、0.501、0.343 g和9.13 kJ;对虾以湿重、干重、蛋白质、能量表示的增重率也表现为相同的趋势(表2)。

### 2.2 不同处理中中国明对虾对不同饵料的总摄食量及组成

中国明对虾在不同处理中摄入的各种饵料的比例不同,在所有与PW同时投喂的处理中,PW以干重、蛋白质、能量形式表示时都占总摄入量的大部分,超过65%(表3)。而在CF+FD处理中,FD占摄入饵料的大部分,以干重、蛋白质、能量表示时分别为61.27%、52.80%、59.43%(表3)。在所有其它与FD同时投喂的处理中,FD都占总摄食量的一定比例,超过7%(表3)。

表2 不同形式表示的放养对虾和收获对虾的重量和增长率 (平均值 ± SE)  
Tab. 2 The weight of initial shrimp and final shrimp and weight gain (mean ± SE)

饵料搭配 diets combination	放养对虾 initial shrimp				收获对虾 final shrimp				增重率/% weight gain			
	WW/g	DW/g	P/g	E/kJ	WW/g	DW/g	P/g	E/kJ	WW	DW	P	E
FF	0.807 ± 0.006	0.175 ± 0.001	0.127 ± 0.001	3.26 ± 0.05	0.993 ± 0.063 <sup>a</sup>	0.189 ± 0.001 <sup>a</sup>	0.134 ± 0.001 <sup>a</sup>	3.31 ± 0.17 <sup>a</sup>	22.76 ± 6.37 <sup>a</sup>	7.60 ± 1.56 <sup>a</sup>	5.45 ± 0.59 <sup>a</sup>	1.30 ± 0.13 <sup>a</sup>
SF	0.803 ± 0.007	0.174 ± 0.001	0.126 ± 0.001	3.25 ± 0.01	1.090 ± 0.071 <sup>ab</sup>	0.200 ± 0.010 <sup>a</sup>	0.141 ± 0.001 <sup>a</sup>	3.51 ± 0.01 <sup>a</sup>	35.76 ± 3.09 <sup>ab</sup>	14.81 ± 1.82 <sup>a</sup>	11.24 ± 1.77 <sup>a</sup>	8.30 ± 0.172 <sup>a</sup>
CF	0.805 ± 0.005	0.174 ± 0.002	0.127 ± 0.001	3.25 ± 0.02	1.324 ± 0.007 <sup>abc</sup>	0.270 ± 0.004 <sup>ab</sup>	0.194 ± 0.001 <sup>ab</sup>	4.90 ± 0.13 <sup>ab</sup>	64.55 ± 3.76 <sup>abc</sup>	54.66 ± 3.62 <sup>ab</sup>	53.23 ± 3.58 <sup>ab</sup>	50.76 ± 3.53 <sup>ab</sup>
PW	0.807 ± 0.004	0.175 ± 0.001	0.127 ± 0.001	3.26 ± 0.01	1.970 ± 0.175 <sup>cd</sup>	0.472 ± 0.099 <sup>de</sup>	0.326 ± 0.002 <sup>de</sup>	9.13 ± 0.16 <sup>e</sup>	144.19 ± 8.67 <sup>cd</sup>	169.91 ± 9.68 <sup>de</sup>	157.01 ± 9.67 <sup>de</sup>	180.33 ± 9.52 <sup>e</sup>
FD	0.801 ± 0.009	0.174 ± 0.001	0.126 ± 0.001	3.24 ± 0.09	1.408 ± 0.097 <sup>bcd</sup>	0.286 ± 0.068 <sup>ab</sup>	0.203 ± 0.008 <sup>ab</sup>	5.32 ± 0.31 <sup>abc</sup>	76.00 ± 6.25 <sup>bcd</sup>	64.90 ± 5.37 <sup>e</sup>	61.43 ± 3.95 <sup>abc</sup>	64.65 ± 4.03 <sup>abc</sup>
CF + PW	0.802 ± 0.006	0.174 ± 0.002	0.126 ± 0.001	3.24 ± 0.03	2.089 ± 0.175 <sup>f</sup>	0.501 ± 0.051 <sup>c</sup>	0.343 ± 0.007 <sup>e</sup>	9.42 ± 0.14 <sup>e</sup>	160.88 ± 9.31 <sup>f</sup>	188.68 ± 9.34 <sup>bcd</sup>	172.13 ± 9.89 <sup>e</sup>	191.23 ± 8.74 <sup>e</sup>
CF + FD	0.802 ± 0.008	0.174 ± 0.001	0.126 ± 0.001	3.24 ± 0.05	1.607 ± 0.109 <sup>cde</sup>	0.378 ± 0.078 <sup>bcd</sup>	0.268 ± 0.007 <sup>bcd</sup>	7.38 ± 0.48 <sup>cde</sup>	100.39 ± 5.29 <sup>cde</sup>	117.79 ± 6.58 <sup>de</sup>	112.33 ± 6.37 <sup>bcd</sup>	127.86 ± 5.36 <sup>cde</sup>
PW + FD	0.803 ± 0.001	0.174 ± 0.001	0.126 ± 0.001	3.24 ± 0.07	1.848 ± 0.171 <sup>ef</sup>	0.430 ± 0.041 <sup>de</sup>	0.301 ± 0.001 <sup>de</sup>	8.38 ± 0.51 <sup>de</sup>	129.86 ± 9.18 <sup>ef</sup>	147.02 ± 7.23 <sup>bcd</sup>	138.41 ± 7.54 <sup>de</sup>	158.16 ± 5.78 <sup>de</sup>
CF + PW + FD	0.804 ± 0.002	0.174 ± 0.001	0.126 ± 0.001	3.25 ± 0.03	1.670 ± 0.031 <sup>cde</sup>	0.367 ± 0.095 <sup>bcd</sup>	0.260 ± 0.004 <sup>bcd</sup>	6.72 ± 0.41 <sup>bcd</sup>	107.62 ± 9.57 <sup>cde</sup>	110.82 ± 5.36 <sup>bcd</sup>	105.54 ± 4.29 <sup>bcd</sup>	106.97 ± 4.19 <sup>bcd</sup>
FF + CF + PW + FD	0.807 ± 0.004	0.175 ± 0.001	0.127 ± 0.001	3.26 ± 0.01	1.676 ± 0.109 <sup>cde</sup>	0.395 ± 0.035 <sup>cde</sup>	0.277 ± 0.001 <sup>cde</sup>	7.45 ± 0.50 <sup>cde</sup>	107.60 ± 8.65 <sup>cde</sup>	125.67 ± 4.31 <sup>cde</sup>	118.27 ± 4.68 <sup>cde</sup>	128.48 ± 4.33 <sup>cde</sup>
FF + SF + CF + PW + FD	0.809 ± 0.001	0.175 ± 0.001	0.127 ± 0.001	3.26 ± 0.01	1.732 ± 0.076 <sup>def</sup>	0.356 ± 0.069 <sup>cde</sup>	0.275 ± 0.009 <sup>cde</sup>	7.31 ± 0.36 <sup>cde</sup>	113.96 ± 9.76 <sup>de</sup>	122.81 ± 7.69 <sup>cde</sup>	116.02 ± 5.17 <sup>bcd</sup>	123.41 ± 4.69 <sup>cde</sup>

注: 同一列中没有相同字母上标的数值相互之间存在显著差异。WW、DW、P、E 分别表示数值以湿重、干重、蛋白质、能量表示

Note: Values without same letter in the same column are different from each other. WW, DW, P, and E mean values expressed in wet weight, dry weight, protein and energy, respectively.

表3 不同处理中不同饵料的百分比例 (平均值 ± SE)  
Tab. 3 Percentages of different diets in different treatments (mean ± SE)

饵料搭配 diets combination	干重 dry weight					蛋白质 protein					能量 energy				
	FF	SF	CF	PW	FD	FF	SF	CF	PW	FD	FF	SF	CF	PW	FD
FF	100 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	100 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	100 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>
SF	0 <sup>a</sup>	100 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	100 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	100 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>
CF	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	100 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	100 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	100 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>
PW	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	100 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	100 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	100 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>
FD	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	100 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	100 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	100 <sup>b</sup>
CF + PW	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	6.64 ± 0.87 <sup>b</sup>	93.39 ± 0.86 <sup>c</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	6.25 ± 0.82 <sup>b</sup>	93.75 ± 0.82 <sup>c</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	6.55 ± 0.86 <sup>b</sup>	93.45 ± 0.86 <sup>c</sup>	0 <sup>a</sup>
CF + FD	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	38.76 ± 6.87 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>	61.27 ± 6.89 <sup>c</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	47.20 ± 7.48 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>	52.80 ± 7.48 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	40.57 ± 7.03 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>	59.43 ± 7.03 <sup>c</sup>
PW + FD	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	75.49 ± 2.92 <sup>c</sup>	24.50 ± 2.92 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	82.54 ± 2.77 <sup>c</sup>	17.46 ± 2.27 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	77.20 ± 2.77 <sup>c</sup>	22.80 ± 2.77 <sup>b</sup>
CF + PW + FD	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	5.23 ± 1.95 <sup>ab</sup>	83.64 ± 4.75 <sup>c</sup>	11.13 ± 3.98 <sup>b</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	5.19 ± 1.93 <sup>ab</sup>	87.153 ± 75 <sup>d</sup>	7.66 ± 2.79 <sup>c</sup>	0 <sup>a</sup>	0 <sup>a</sup>	5.26 ± 1.95 <sup>ab</sup>	84.47 ± 4.49 <sup>c</sup>	10.27 ± 3.69 <sup>b</sup>
FF + CF + PW + FD	7.09 ± 2.65 <sup>ab</sup>	0 <sup>a</sup>	2.06 ± 0.85 <sup>a</sup>	72.58 ± 6.58 <sup>c</sup>	18.19 ± 4.42 <sup>b</sup>	9.55 ± 3.49 <sup>ab</sup>	0 <sup>a</sup>	2.04 ± 0.23 <sup>ab</sup>	75.926 ± 32 <sup>e</sup>	12.49 ± 3.19 <sup>b</sup>	7.62 ± 2.83 <sup>ab</sup>	0 <sup>a</sup>	2.06 ± 1.19 <sup>a</sup>	73.52 ± 6.51 <sup>c</sup>	16.80 ± 4.14 <sup>b</sup>
FF + SF + CF + PW + FD	8.52 ± 1.02 <sup>a</sup>	5.51 ± 0.49 <sup>a</sup>	0.98 ± 0.15 <sup>a</sup>	66.61 ± 5.28 <sup>c</sup>	18.37 ± 4.74 <sup>b</sup>	11.29 ± 1.30 <sup>b</sup>	6.97 ± 0.69 <sup>ab</sup>	0.96 ± 0.31 <sup>a</sup>	68.364 ± 35 <sup>e</sup>	12.42 ± 3.35 <sup>b</sup>	9.11 ± 1.08 <sup>ab</sup>	5.96 ± 0.54 <sup>a</sup>	0.98 ± 0.57 <sup>a</sup>	67.07 ± 5.05 <sup>c</sup>	16.88 ± 4.40 <sup>b</sup>

注: 同一行中没有相同字母上标的数值相互之间存在显著差异

Note: Values without same letter in the same column are different from each other.

中国明对虾在不同处理中的总摄食量不同,以单独投喂PW的处理最大,以干重、蛋白质、能量表示时分别为1.352、0.959 g、28.810 kJ;单独投

喂FF时摄食量最小,相应的量分别为0.197、0.180 g、4.444 kJ;6个混合投喂处理的摄食量都没有超过单独投喂PW处理的摄食量(表4)。

表4 不同处理中对虾摄入的饵料干重、蛋白质和能量(平均值±SE)

Tab. 4 Total dry weight, protein, and energy of ingested diets in different treatments (mean ± SE)

处理 treatment	干重/g dry weight	蛋白质/g protein	能量/kJ energy
FF	0.197 ± 0.027 <sup>a</sup>	0.180 ± 0.024 <sup>a</sup>	4.444 ± 0.603 <sup>a</sup>
SF	0.527 ± 0.044 <sup>b</sup>	0.458 ± 0.038 <sup>b</sup>	12.047 ± 1.012 <sup>b</sup>
CF	0.733 ± 0.044 <sup>bc</sup>	0.487 ± 0.029 <sup>bc</sup>	15.379 ± 0.922 <sup>bc</sup>
PW	1.352 ± 0.125 <sup>c</sup>	0.959 ± 0.089 <sup>c</sup>	28.810 ± 2.660 <sup>f</sup>
FD	1.144 ± 0.033 <sup>de</sup>	0.526 ± 0.015 <sup>bcd</sup>	22.162 ± 0.647 <sup>de</sup>
CF + PW	1.150 ± 0.069 <sup>de</sup>	0.813 ± 0.049 <sup>de</sup>	24.490 ± 1.478 <sup>cde</sup>
CF + FD	0.976 ± 0.124 <sup>cd</sup>	0.528 ± 0.070 <sup>bcd</sup>	19.530 ± 2.498 <sup>bc</sup>
PW + FD	1.250 ± 0.086 <sup>e</sup>	0.809 ± 0.048 <sup>de</sup>	26.028 ± 1.732 <sup>ef</sup>
CF + FD + PW	0.933 ± 0.079 <sup>cd</sup>	0.633 ± 0.052 <sup>cd</sup>	19.660 ± 1.648 <sup>cd</sup>
FF + CF + PW + FD	0.909 ± 0.114 <sup>cd</sup>	0.614 ± 0.074 <sup>bcd</sup>	19.111 ± 2.356 <sup>cd</sup>
FF + SF + CF + PW + FD	0.983 ± 0.068 <sup>cd</sup>	0.676 ± 0.039 <sup>cd</sup>	20.776 ± 1.375 <sup>cde</sup>

注:同一列中未标有相同字母的数值相互之间存在显著差异

Note: Values without same letter in the same column are different from each other.

表5 不同处理中的预测饵料转化效率与实际饵料转化效率(平均值±SE)

Tab. 5 The estimated food conversion efficiencies and observed food conversion efficiencies of different treatments (mean ± SE) %

处理 treatment	干重 dry weigh		蛋白质 protein		能量 energy	
	预测值	实际值	预测值	实际值	预测值	实际值
	estimated	observed	estimated	observed	estimated	observed
FF	6.37	6.37 ± 0.47 <sup>a</sup>	3.50	3.50 ± 0.43 <sup>a</sup>	0.48	0.48 ± 0.13 <sup>a</sup>
SF	4.92	4.92 ± 0.54 <sup>a</sup>	3.10	3.10 ± 0.44 <sup>a</sup>	2.22	2.22 ± 0.45 <sup>ab</sup>
CF	13.07	13.07 ± 0.86 <sup>ab</sup>	13.89	13.89 ± 0.92 <sup>ab</sup>	10.78	10.78 ± 0.73 <sup>bed</sup>
PW	21.25	21.25 ± 2.75 <sup>bc</sup>	20.05	20.05 ± 2.74 <sup>bc</sup>	19.76	19.76 ± 2.46 <sup>de</sup>
FD	9.85	9.85 ± 1.59 <sup>a</sup>	14.71	14.71 ± 2.45 <sup>ab</sup>	9.44	9.44 ± 1.53 <sup>bc</sup>
CF + PW	20.71 ± 0.07	*27.86 ± 3.43 <sup>c</sup>	19.66 ± 0.05	*26.08 ± 3.38 <sup>bc</sup>	19.17 ± 0.08	24.74 ± 3.02 <sup>e</sup>
CF + FD	11.10 ± 0.22	*22.03 ± 5.63 <sup>bc</sup>	14.32 ± 0.06	*28.90 ± 4.56 <sup>c</sup>	9.99 ± 0.09	22.39 ± 5.71 <sup>e</sup>
PW + FD	18.45 ± 0.33	20.10 ± 2.41 <sup>bc</sup>	19.12 ± 0.12	21.26 ± 2.82 <sup>bc</sup>	17.41 ± 0.29	19.39 ± 2.27 <sup>de</sup>
CF + FD + PW	19.56 ± 0.51	21.11 ± 2.93 <sup>bc</sup>	19.32 ± 0.21	21.58 ± 3.28 <sup>bc</sup>	18.23 ± 0.45	18.05 ± 2.58 <sup>cde</sup>
FF + CF + PW + FD	17.93 ± 0.79	*24.67 ± 4.13 <sup>c</sup>	17.68 ± 0.70	*24.92 ± 4.41 <sup>bc</sup>	16.37 ± 0.86	*22.37 ± 3.75 <sup>e</sup>
FF + SF + CF + PW + FD	16.91 ± 0.62	*21.91 ± 2.31 <sup>bc</sup>	16.28 ± 0.39	*21.84 ± 2.51 <sup>bc</sup>	15.13 ± 0.58	*19.43 ± 2.07 <sup>de</sup>

注:同一列没有相同字母标记的数值相互之间存在显著差异。标有“\*”的实测值显著比预测值大( $P < 0.05$ )

Note: Values without same letter in the same column are different from each other. Observed values with ‘\*’ were significantly higher than the estimated.

### 2.3 不同处理中国明对虾对饵料转化效率(FCE)的预测值与实际值

中国明对虾摄食不同饵料后的实际饵料转化效率(FCE)不同,CF+PW处理的FCE最高,以干重、蛋白质、能量表示时分别为27.86%、26.08%、24.47%,单独投喂FF和SF的处理最低,以3种形式表示时都低于7%(表5)。在不同饵料搭配的处理中,饵料的实际转化效率除在PW+FD和CF+FD+PW两个处理以干重形式表示时略小于单独投喂PW处理外,均高于所有单独投喂一种饵料的处理(表5)。所有混合投喂处理的实际饵料转化效率都比预测值高,并且除了PW+FD和CF+FD+PW两个处理的实际值与预测值差异不显著外,其它处理的饵料转化效率实际值都显著高于预测值。

## 3 讨论

### 3.1 中国明对虾同时摄食不同饵料的优势

中国明对虾摄食不同的混合饵料后,在生长速度上都比除了PW外的任何单种饵料投喂的处理有了不同程度的提高,并且CF+PW处理的对虾生长比单独投喂PW快(表2),这与南美白对虾<sup>[20]</sup>和日本对虾<sup>[9]</sup>摄食混合饵料时生长比摄食单种饵料时生长快的现象相同,表明对虾通过不同饵料的搭配,能够提高生长速度,并且这些较高的生长速度不是通过摄食量的显著增加来获得的(表4)。同时,对虾摄食不同的混合饵料后,饵料转化效率绝大多数比摄食单种饵料时有不同程度的提高,并比假设不同饵料同时投喂时相互之间对饵料转化效率无影响前提下预测的饵料转化效率高(表5),而且这种转化效率的提高不是以提高摄食量来实现的(表4),表明不同饵料之间存在一种积极的相互作用。这种积极相互作用对对虾摄食策略可能有重要影响,可能是导致对虾杂食性的主要原因之一。一般认为由于喜食饵料的缺乏和季节波动<sup>[23,24]</sup>,对虾为减少饥饿和营养不良的胁迫而摄入不十分喜食的饵料。但实验条件下发现即使是喜食饵料过量存在时,对虾也摄入部分不十分喜食的饵料<sup>[8]</sup>。由于对虾在天然环境中喜食的饵料是有限的,如果只摄食某种饵料就需要花较多的能量觅食,而采用不同饵料同时摄入的策略,同样可以

获得与摄食单种较好饵料的相当生长速度和饵料转化效率,这样不仅可以节约觅食的能量消耗,也能更有效地利用饵料资源。

### 3.2 不同饵料搭配对饵料营养和能量特征的影响

不同饵料同时投喂对虾时,对虾在生长和饵料转化效率比投喂单种饵料时好,这种相互作用产生有可能是由于不同饵料中的氨基酸组成不同,混合摄入后相互补充了必需氨基酸,产生蛋白质的互补作用或氨基酸互补作用<sup>[25]</sup>,从而提高了整体的转化效率,也有可能是饵料的其它因素起了重要的作用。尽管饵料中哪些因素对这些积极作用起了主要作用还不十分清楚,但在中国明对虾摄入的饵料中,不同混合饵料的营养和能量特征与单种饵料相比都发生变化(表1)。值得注意的是在混合饵料中饵料的能量蛋白比(E/P)发生了变化,E/P较高的FD与PW混合后,E/P由42.12降低到37.14 kJ·g<sup>-1</sup>,而其它混合组的E/P都为30.70~32.15 kJ·g<sup>-1</sup>,这与薛敏等<sup>[26]</sup>得到的体重为0.368~0.699和1.025~1.525 g的中国明对虾幼虾最适可消化能量与可消化蛋白(DE/DP)比分别为30.88和28.93 kJ·g<sup>-1</sup>的结果非常接近,也与本实验中使对虾生长最好的单种饵料PW的E/P(30.04 kJ·g<sup>-1</sup>)非常接近。混合饵料的脂肪含量也比脂肪含量较低的FF、SF、CF有显著提高,达到7.28%~10.53%;并使饵料的脂肪蛋白比(L/P)比FF、SF、CF显著提高,达到0.136~0.162的范围,与使对虾生长最好和饵料转化效率最高的单种饵料PW的L/P值0.155非常接近。而在以往的研究中,都发现了甲壳动物有一个最适的饵料能量蛋白比(E/P)或脂肪蛋白比(L/P),使动物摄入的饵料能量最大限度地转化为生长能<sup>[26-29]</sup>,并且发现在蛋白质得到满足的前提下,能量和脂肪含量的提高都能够显著提高动物对蛋白质的利用率,产生蛋白质的节约作用<sup>[19,26,29,30]</sup>。在本实验中,可能是由于对虾选择性摄食后,混合饵料中能量蛋白比、脂肪含量和脂肪蛋白比的得到调整,使中国明对虾对饵料的蛋白质利用率提高,从而提高了饵料的转化效率,并获得了不同饵料搭配的积极性相互作用。

## 参考文献

- [1] Chong V C, Sasekumar A. Food and feeding habits of white prawn *Penaeus merguensis* [J]. Mar Ecol Prog Ser, 1981, 5 (2): 185-191.
- [2] Cockcroft A, McLachlan A. Food and feeding habits of the surf zone penaeid prawn *Macropetasma africanus* (Balss) [J]. Mar Ecol, 1986, 7 (4): 345-357.
- [3] Minami T. Predator-prey relationship and trophic levels of the pink shrimp, *Pandalus eous*, in the Yamato Bank, the Sea of Japan [J]. J Shelf Res, 2000, 19 (1): 553-554.
- [4] Newell R I E, Marshall N, Sasekumar A, et al. Relative importance of benthic microalgae, phytoplankton, and mangroves as sources of nutrition for penaeid prawns and other coastal invertebrates from Malaysia [J]. Mar Biol, 1995, 123 (3): 595-606.
- [5] Nunes A J P, Parsons G J. Effects of the southern brown shrimp, *Penaeus subtilis*, predation and artificial feeding on the population dynamics of benthic polychaetes in tropical pond enclosures [J]. Aquac, 2000, 183 (1-2): 125-147.
- [6] Nunes A J P, Gesteira T C V, Goddard S. Food ingestion and assimilation by the southern brown shrimp *Penaeus subtilis* under semi-intensive culture in NE Brazil [J]. Aquac, 1997, 149 (1-2): 121-136.
- [7] Schwaborn R, Griaes M M. Feeding strategy and daily ration of juvenile pink shrimp (*Farfantepenaeus durarum*) in a South Florida seagrass bed [J]. Mar Biol, 2000, 137 (1): 139-147.
- [8] Dall W, Hill J, Rothlisberg P C, et al. 对虾生物学. 陈楠生, 杨雪梅, 李新正, 等译 [M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1992. 339-357.
- [9] Liao I C. Study on the feeding of Kuruma shrimp, *Penaeus japonicus* [J]. China Fisheries, 1969, 197: 17-18.
- [10] Alam M J, Ang K J, Begum M. Ingestion efficiency of *Macrobrachium rosenbergii* (de Man) larvae feeding on *Artemia*, *Moina micrura* Kurz and their combination [J]. Aquac Res, 1996, 27 (2): 113-120.
- [11] Buskey E J, Coulter C, Strom S. Locomotory patterns of microzooplankton: Potential effects on food selectivity of larvae fish [J]. Bull Mar Sci, 1991, 53 (1): 29-43.
- [12] Griffiths D. Prey availability and food of predators [J]. Ecol, 1975, 56 (5): 1209-1214.
- [13] Manghagen C, Wiederholm A M. Food selectivity versus prey availability: A study using the marine fish *Pomatoschistus microps* [J]. Oecologia, 1982, 55 (3): 311-315.
- [14] Mehner T, Plewa M, Huelsmann S, et al. Gape-size dependent feeding of age-0 perch (*Perca fluviatilis*) and age-0 zander (*Stizostedion lucioperca*) on *Daphnia galeata* [J]. Archiv fuer Hydrobiologie, 1998, 142 (2): 191-207.
- [15] Mikheev V N. Prey size and food selectivity in young fishes [J]. J Ichth, 1984, 24 (2): 66-76.
- [16] Sunaga T. Relationship between food consumption and food selectivity in fishes: II. Experimental study on the food selection by juvenile guppy (*Poecilia reticulata*) [J]. Jap J Ecol, 1971, 21 (1-2): 67-70.
- [17] Elner R W, Hughes R N. Energy maximization in the diet of the shore crab, *Carcinus maenas* [J]. J Anim Ecol, 1978, 47 (1): 103-107.
- [18] Kislalioglu M, Gibson R N. Prey 'handling time' and its importance in food selection by the 15-spined stickleback, *Spinachia spinachia* (L) [J]. J Exp Mar Biol Ecol, 1976, 25 (2): 151-158.
- [19] Company R, Calduch-Giner J A, Kaushik S, et al. Protein sparing effect of dietary lipids in common dentex (*Dentex dentex*): A comparative study with sea bream (*Sparus aurata*) and sea bass (*Dicentrarchus labrax*) [J]. Aquat Living Resour, 1999, 12 (1): 23-30.
- [20] Chamberlain G W, Lawrence A L. Maturation, reproduction and growth of *Penaeus vannamei* and *P. stylirostris* fed natural diets [J]. J World Mariculture Soc, 1981, 12 (1): 209-224.
- [21] AOAC (Association of Official Analytical Chemists). Official methods of analysis (14th edn.) [M]. Arlington, VA, Association of Official Analytical Chemists, 1984. 1141.
- [22] Wu L, Dong S, Wang F, et al. Compensatory growth response following periods of starvation in Chinese shrimp, *Fenneropenaeus ovbecki* [J]. J Shelf Res, 2000, 19 (2): 717-722.
- [23] Luna-Marte C. The food and feeding habit of *Penaeus monodon* Fabricius collected from Makato river, Aklan, Philippines (Decapoda, Natantia) [J]. Crustaceana, 1980, 38 (3): 225-236.
- [24] Luna-Marte C. Seasonal variation in food and feeding of *Penaeus monodon* Fabricius (Decapoda, Natantia) [J]. Crustaceana, 1982, 42 (3): 250-255.
- [25] 李爱杰. 水产动物营养与饲料学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1996. 18-19.
- [26] 薛敏, 李爱杰, 董双林, 等. 不同规格中国对虾最适可消化蛋白质与能量比值的研究 [J]. 青岛海洋大学学报, 1998, 28 (2): 245-251.
- [27] 徐新章, 李爱杰. 中国对虾对配合饲料种蛋白质、碳水化合物、纤维素和脂肪的日常需要和最适含量的研究 [J]. 海洋科学, 1988, (6): 1-6.
- [28] 虞冰如, 沈 玢. 罗氏沼虾饲料中最适蛋白质、脂肪及能蛋比的研究 [J]. 水产学报, 1990, 14 (4): 321-327.
- [29] Morais S, Bell J G, Robertson D A, et al. Protein/lipid ratios in extruded diets for Atlantic cod (*Gadus morhua* L.): effects on growth, feed utilization, muscle composition and liver histology [J]. Aquac, 2001, 203 (1-2): 101-119.
- [30] Sedgwick R W. Influence of dietary protein and energy on growth, food consumption and food conversion efficiency in *Penaeus merguensis* [J]. Aquac, 1979, 16 (1): 7-30.