

245-252

S.968.226

中国对虾幼虾饲料中最佳蛋白能量比研究

S.963.223.3

薛敏 李爱杰 董双林 张显娟

(青岛海洋大学, 国家教委水产养殖开放实验室, 青岛·266003)

摘要 实验对不同规格的中国对虾(0.368~0.699g; 1.025~1.525g)投喂饲料的最佳可消化蛋白质与可消化能比值(DP/DE)进行了研究。将精制饲料配成3个蛋白水平, 每个蛋白水平包括4个能量级。实验结果表明: 不同时期中国对虾对蛋白利用率不同, 较大规格的对虾对蛋白质利用率比较小规格高; 对于以上2个不同规格的中国对虾, 饲料最适 DP/DE 分别在 145.2mg/kcal 和 136.4mg/kcal 时, 获得最大增重率、最佳蛋白质效率和最低饲料系数; 存活率有随蛋白质含量增加而增加的趋势。

关键词 中国对虾; 饲料; 可消化蛋白质与消化能之比(DP/DE)

中图分类号 Q959.233+63^①; S816; R151.2

幼虾 蛋白能量比
虾下

0 前言

在饲料中, 蛋白质是必需的却又是贵的成分。在以非蛋白能源物质代替蛋白质的实验中, 许多学者都发现碳水化合物较脂肪有更广泛的节约效用^[1,2,3]。Cho^[4]提出以生物能量学的方法来指导动物营养与饲料学上所有的饲喂标准与生产实践, 并根据适宜可消化蛋白与消化能之比(DP/DE)更为准确地估算日投饵量和产量。所以, 在决定其它的营养需求之前, 蛋白能量比是最基础的一个参数。

在蛋白能量比的研究上, 许多作者采用了不同的标准。大多数学者采用了单纯的蛋白能量比或能量蛋白比(P/E 或 E/P)^[5,6], 亦有采用可消化蛋白与可消化能之比或可消化能与可消化蛋白之比 DP/DE (或 DE/DP) 的^[4]。在对大菱鲆(*Scophthalmus maximus* L.) 的研究中发现, 无论饲料成分如何, 其对能量的转化率没有影响, 但对蛋白质转化率的影响却很明显^[7]。采用 DP/DE 来说明能量与蛋白质之间的动态关系, 因为排除了蛋白质和能量在消化率上的差异, 故而较 P/E 更为有效。目前, 对于中国对虾配饵中最适 DP/DE 的研究尚属空白, 本文旨在对两种规格的中国对虾配合饲料中最适 DP/DE 进行研究, 力求以最低的蛋白质添加量获得最大的生产量, 为生产实践中的配方设计提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 实验材料 本实验于1996年6月~9月进行, 购自红岛镇对虾养殖场, 在青岛海洋大学

• 山东省自然科学基金(Q95D0732)、国家自然科学基金(39430150)和国家“九五”攻关专题(96-922-02-02)资助

收稿日期: 1997-07-19; 修订日期: 1998-01-11

薛敏, 女, 1972年11月出生, 硕士。

太平角实验基地中国对虾(*Penaeus chinensis*)驯养半月,投以实验用精制饲料使其适应,挑选健康、食欲旺盛的对虾为实验材料,实验前停食1d。

1.2 实验饲料 实验基础饲料以酪蛋白、白明胶为蛋白源,固定脂肪添加量为6%,以糊精调节饲料能量,用纤维素粉调至饲料为100%。蛋白质含量分三个水平(设计为40%、45%、50%)。每一蛋白水平设4个能量级,实验基础饲料配方见表1。

表1 基础饲料组成成分表
Table 1 Composition of the basal diet

组别 Block	酪蛋白 Casein	白明胶 Gelatin	糊精 Dextrin	纤维素 Cellulose	饲料能量 kcal/100g 饲料 Dietary calorie		蛋白质含量 Protein level%	
					设计值 Designed value	实测值 Real value	设计值 Designed value	实测值 Real value
					1	37.2	6.7	15
2	37.2	6.7	20	13	294.0	298.8	40	40.70
3	37.2	6.7	25	8	314.0	319.2	40	36.12
4	37.2	6.7	30	3	334.0	334.5	40	37.72
5	40.8	7.8	15	13.3	294.0	299.5	45	45.28
6	40.8	7.8	20	8.3	314.0	318.7	45	44.21
7	40.8	7.8	25	3.3	334.0	336.8	45	43.96
8	40.8	7.8	30	0	354.0	360.2	45	44.53
9	44.6	8.4	15	8.9	314.0	319.2	50	50.36
10	44.6	8.4	20	5.9	334.0	334.9	50	47.88
11	44.6	8.4	25	2.9	354.0	358.4	50	49.92
12	44.6	8.4	30	0	374.0	379.2	50	48.20

注:①饲料中的其它成分(other ingredients):1. 鱼油(fish oil):3; 花生油(peanut oil):3; 2. 虾糠(shrimp powder):5; 3. 胆固醇(cholesterol):1; 4. 卵磷脂(lecithin):2; 5. 沸石(zeolite):0-2.5; 6. 褐藻胶(algin):2; 7. 维生素混合物(mixed vitamins):2; 8. 无机盐混合物(mixed minerals):2.5; 9. Cr_2O_3 :0.1%。

②饲料热量设计值的计算(the calculation of dietary calorie):每克脂肪、蛋白质、碳水化合物的热量值分别为9.4、4.4 kcal,纤维素不计算能量,单位1kcal=4.187×10³J(下文同),per gram of lipid, protein, carbohydrate is equal to 9.4, 4.4 kcal respectively, the calorie in cellulose is not calculated.

1.3 实验方法 实验分两期,对不同规格的中国对虾进行研究(0.368g~0.699g 和 1.025g~1.525g)。设3个蛋白水平,每一水平设4个能量级,共有12组饲料。每组饲料设3个重复,各选25尾规格相近的中国对虾,分养于36个容量为50L海水的玻璃钢水桶中,连续充气,水温19~25℃,每天换水1次。每天9:00、16:00投饵2次,收集残饵2次,发现死虾及时捞出并称重。摄食2h后,收集粪便,每一实验期为31d。

1.3.1 消化率测定 同一组饲料的3个平行实验箱的粪便合并混合,烘干后供分析用。饲料及粪便中的 Cr_2O_3 的含量用WFX-1C型原子吸收光谱法测定^[8];蛋白质含量用改良的凯氏定氮法测定;能值用RY-1型氧弹式热量计测定(以苯甲酸为标准物)。

1.3.2 实验结果计算

$$\text{能量消化率(DE)} = 100 \times \left(1 - \frac{\text{饲料中 } Cr_2O_3 \text{ 含量} \times \text{粪便的总能水平}}{\text{粪便中 } Cr_2O_3 \text{ 含量} \times \text{饲料的总能水平}} \right)$$

$$\text{蛋白质消化率(DP)} = 100 \times \left(1 - \frac{\text{饲料中 } \text{Cr}_2\text{O}_3 \text{ 含量} \times \text{粪便蛋白质含量}}{\text{粪便中 } \text{Cr}_2\text{O}_3 \text{ 含量} \times \text{饲料蛋白质含量}} \right)$$

$$\text{增重率(\%)} = 100 \times \frac{(\text{总终重} + \text{死亡虾重}) - \text{总初重}}{\text{总初重}}$$

$$\text{存活率(\%)} = 100 \times \frac{\text{收虾尾数}}{\text{放虾尾数}}$$

$$\text{蛋白质效率(PER)} = \frac{\text{平均增重量}}{\text{饲料摄取量} \times \text{蛋白质含量}}$$

$$\text{饲料系数(FCR)} = \frac{\text{投饵量} - \text{残饵量}}{\text{增重量}}$$

用干湿比换算法求出残饵量,即称出一定量的干饵料,在海水中浸泡投饵的同等时间取出,用滤纸吸干,称重求出干湿换算系数 K,残饵乘以换算系数 K 即得残饵量。

2 实验结果

两期的生长试验结果分别列入表 2 和表 3;实验 1(0.368~0.699g)和实验 2(1.025~1.525g)中 DP/DE 与增重率、饲料系数的关系分别见图 1、2、3、4。

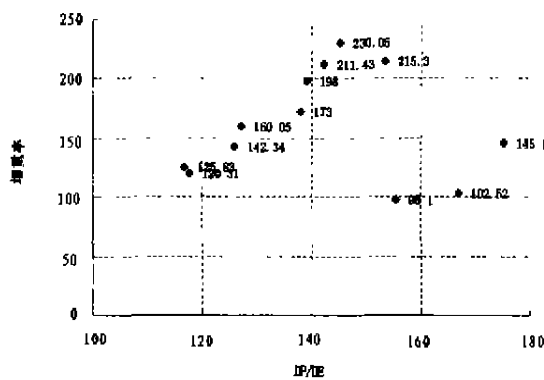


图 1 蛋白能量比与增重率的关系

Fig. 1 The relationship between DP/DE and weight gain rate (0.368~0.699g)

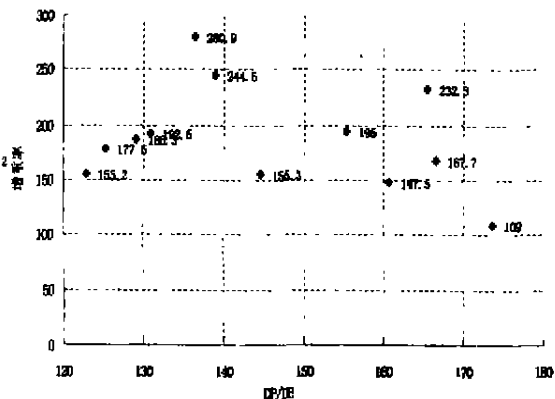


图 2 蛋白能量比与增重率的关系

Fig. 2 The relationship between DP/DE and weight gain rate (1.025~1.525g)

实验 1 中,对虾规格为 0.368g~0.699g,DP/DE 的范围为 116.99~175.28mg/kcal。从图 1、3 和表 2 中可见,DP/DE 约为 142~153mg/kcal 时,饲料系数较低(第 2、6、10 组),增重率也较高(第 2、6、10、12 组),超出这一范围,则结果明显不理想($F_{(FCR)} > 2.22, q_{(FCR)} = 0.51$; $F_{(WGR)} > 2.22, q_{(WGR)} = 21.30$)。当蛋白质为 40%,能值为 294kcal/100g 饲料(DP/DE 为 145.20 mg/kcal)时达到最理想值,蛋白质含量进一步增加到 45%、50%水平时,对于增重及饲料系数而言并无益处。

实验 2 中,对虾规格为 1.025~1.525g,DP/DE 的范围为 123~173.6mg/kcal。从图 2、4 和表 3 中可见,DP/DE 约为 136~139mg/kcal 时(第 6、7 组),另外第 9 组,蛋白质含量为 50%,能值为 314kcal/100g 饲料时增重率均较高,差异显著($F_{(FCR)} > 2.22, q_{(FCR)} = 0.35$; $F_{(WGR)} > 2.22, q_{(WGR)} = 15.27$)。前 4 组(蛋白质含量为 40%)生长较差,后 4 组(蛋白质含量为 50%)稍

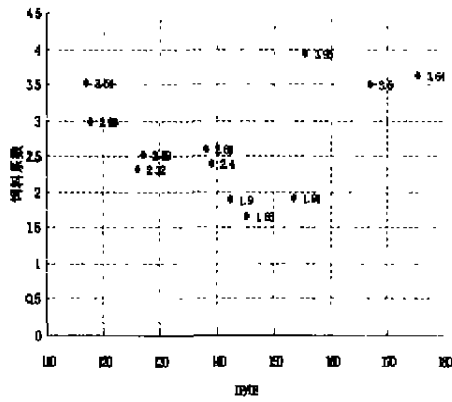


图3 蛋白能量比与饲料系数的关系

Fig. 3 The relationship between DP/DE and FCR (0.368~0.699g)

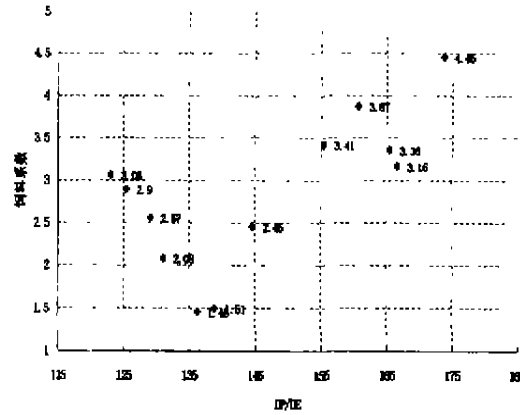


图4 蛋白能量比与饲料系数的关系

Fig. 4 The relationship between DP/DE and FCR (1.025~1.525g)

有提高,当蛋白质含量为45%,能值为314kcal/100g饲料时(DP/DE为136.4mg/kcal)达最大值;另外,第6,7组饲料还获得了最低饲料系数值,第8,11组饲料系数也较低,差异不显著。两次实验方差分析及多重比较结果见表4。

表2 试验投喂结果(实验1)

Table 2 Results of the first feeding experiment

饲料号 Diet No.	平均体重 Average weight (g)		净增重(g) Net weight gain	增重率(%) Weight gain rate 平均 average	饲料系数 (FCR) 平均 average	蛋白质效率 (PER) 平均 average	平均存活率 Average survival rate(%)	DP/DE mg/kcal
	初重 Initial weight (g)	末重 Final weight (g)						
1	0.54±0.16	1.06±0.30	0.52±0.14	98.10±2.88	3.95±0.14	0.64±0.03	44	155.38
2	0.59±0.02	1.93±0.09	1.35±0.09	230.05±5.17	1.66±0.01	1.48±0.01	56	145.20
3	0.58±0.03	1.39±0.05	0.82±0.06	142.34±6.99	2.32±0.07	1.20±0.04	60	126.00
4	0.61±0.06	1.33±0.16	0.73±0.09	120.31±3.15	2.99±0.44	0.89±0.03	68	117.66
5	0.54±0.02	1.33±0.06	0.79±0.04	145.12±4.82	3.64±0.08	0.60±0.01	84	175.28
6	0.59±0.03	1.82±0.08	1.24±0.07	211.43±9.68	1.89±0.03	1.19±0.02	88	142.32
7	0.55±0.04	1.44±0.04	0.89±0.10	160.05±28.30	2.52±0.05	0.90±0.02	80	127.03
8	0.55±0.02	1.23±0.11	0.69±0.09	125.83±3.08	3.54±0.28	0.63±0.05	92	116.99
9	0.56±0.05	1.13±0.12	0.57±0.07	102.52±6.20	3.50±0.20	0.57±0.04	95	166.92
10	0.53±0.03	1.62±0.05	1.14±0.04	215.30±5.22	1.91±0.09	1.09±0.05	93	153.51
11	0.63±0.06	1.74±0.19	1.42±0.15	173.00±6.63	2.61±0.07	0.77±0.02	80	137.97
12	0.61±0.03	1.83±0.06	1.22±0.03	198.00±4.94	2.40±0.02	0.96±0.01	56	139.10

平均值±标准差(average±SD)

表3 试验投喂结果(实验2)

Table 3 Results of the second feeding experiment

饲料号 Diet No.	平均体重 Average weight (g)		净增重(g) Net weight gain	增重率(%) Weight gain rate 平均 average	饲料系数 (FCR) 平均 average	蛋白质效率 (PER) 平均 average	平均存活率 Average survival rate(%)	DP/DE mg/kcal
	初重 Initial weight (g)	末重 Final weight (g)						
	1	1.52±0.12	3.18±0.33	1.66±0.22	109.00±8.65	4.45±0.10	0.45±0.02	40
2	1.46±0.10	3.58±0.29	2.45±0.19	167.70±1.91	3.16±0.09	0.65±0.05	50	166.50
3	1.27±0.21	3.51±0.58	2.25±0.48	177.50±1.43	2.90±0.05	0.66±0.03	55	125.30
4	1.10±0.16	2.81±0.40	1.71±0.25	155.20±1.57	3.06±0.03	0.64±0.03	45	123.00
5	1.17±0.22	2.88±0.53	1.71±0.31	147.50±2.80	3.87±0.29	0.49±0.02	33	150.60
6	1.32±0.13	5.03±0.44	3.70±0.22	280.90±6.42	1.46±0.09	1.21±0.02	40	136.40
7	1.14±0.10	3.92±0.41	2.78±0.31	244.60±5.58	1.51±0.07	0.99±0.08	50	139.00
8	1.13±0.09	3.28±0.26	2.15±0.16	192.50±2.84	2.08±0.08	1.18±0.02	42	131.00
9	1.10±0.07	3.55±0.24	2.48±0.24	232.30±2.69	3.36±0.10	0.52±0.03	45	165.40
10	1.14±0.13	3.35±0.49	2.21±0.33	195.00±8.82	3.41±0.08	0.86±0.02	50	155.30
11	1.11±0.10	2.84±0.30	1.73±0.30	155.30±4.80	2.45±0.06	0.98±0.09	60	144.70
12	1.03±0.15	2.94±0.41	1.91±0.41	186.30±5.34	2.57±0.10	1.01±0.04	65	129.10

平均值±标准差(average±SD)

表4 两次实验方差及多重比较分析结果

Table 4 ANOVA and Tukey honest significant difference test in the two tests

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
FCR1	a	b	ab	ab	a	b	ab	a	a	b	ab	ab
WGR1	c	d	cd	c	cd	d	cd	c	c	d	cd	d
FCR2	e	ef	ef	ef	e	f	f	f	e	e	f	ef
WGR2	g	g	gh	g	g	h	h	gh	h	gh	g	gh

3 讨论

从以上结果可见,蛋白质作为生命的基础在生长与存活中虽然不可缺少,但也并非可以无限制的添加。对于规格为0.368~0.699g的对虾,维持能值在294~314kcal/100g饲料之间,蛋白质含量从40%升到50%,对虾的增重率和饲料系数并无明显改变。而对于较大规格的中国对虾(1.025~1.525g)对蛋白质的需求量较高,维持能值为314~334kcal/100g饲料之间,以蛋

白质含量为45%生长最佳,升到50%只有存活率略有增加,其它指标均无呈现优势。

饲料中适量的碳水化合物和脂肪代替蛋白质用以供能,其节约效用是极其明显的。在对印度对虾(*P. indicus*)的研究表明,以一定量的马铃薯淀粉代替蛋白质,而饲料能值只有很小的变化,当蛋白质含量从53.1%降到42.8%时,对生长没有影响^[2];而墨吉对虾(*P. merguensis*)对蛋白质的有效利用与饲料能值紧密相关,碳水化合物和脂肪在次佳蛋白水平一样可以提高生长效率^[3];在保持蛋白水平不变,脂肪值设为低水平(1~2%)时,淀粉的增加可以显著提高白对虾(*P. setiferus*)和桃红对虾(*P. duorarum*)的生长量,但脂肪为正常或较高水平时,影响却不显著^[4]。

Cho等^[9]认为鲑鳟鱼类饲料的最适DP/DE值为92.4~105mg/kcal;Carling等^[10]采用精制饲料,以斑点叉尾鲷鱼种做实验提出适宜的DP/DE为104.2mg/kcal。中国对虾在生长各期饲料中所需蛋白质都较一般鱼类高,其适宜DP/DE也偏高,说明中国对虾利用非蛋白能源的能力较鱼类稍差一些。

蛋白能量比的确定,在一定意义上就是为了限制过多或不足的蛋白质和能量提供给养殖对象,以避免造成浪费。在两次实验中发现,一些DP/DE不适当的试验饲料耗量往往较大,原因有两方面:(1)饲料蛋白质含量偏低;(2)非蛋白饲料提供过多。从各图结果可见,大规格对虾对蛋白质的需求较小规格的对虾高,这一趋势与梁亚全^[11]的实验结果相同,而与其它种类的对虾如日本对虾(*P. japonicus*)、斑节对虾(*P. monodon*)等正好相反,一般是随着生长饲料蛋白质含量逐渐降低。

两次实验就增重率和饲料系数而言,DP/DE分别在145mg/kcal和136mg/kcal时获得最佳值,但该值并不是绝对的,从生物学角度看,最佳值应该是一个区间。分别以145mg/kcal和136mg/kcal为基准,对两次实验组蛋白质效率(PER)作统计发现,小规格对虾饲料DP/DE在139~153.51mg/kcal之间;大规格对虾饲料DP/DE在136.4~155.3mg/kcal之间,其PER值分为0.96~1.48、0.86~1.21,平均为1.23和1.05。总体而言,充足的能量提供是保证蛋白质效率高的基础。小规格对虾的PER有随蛋白质含量增加而下降的趋势;而较大规格对虾的蛋白质含量在45~50%之间,PER值无明显差异。

两次实验,中国对虾的存活率存在着很大的差异。对于小规格对虾,有随蛋白质含量增加而增加的趋势。在高蛋白含量组(45~50%)中获得明显的高存活率;低蛋白组(40%)及高蛋白高能的第12组的死亡率较高,其中有多方面的原因,诸如蛋白能量比不适宜,蛋白源中氨基酸组分的不平衡等。以30~45%的蛋白质含量,能值水平为357~375kcal/100g饲料的饲料投喂斑节对虾(*P. monodon*),可以保证抵抗蜕壳时的压力^[12]。对于较大规格对虾,各组间中国对虾存活率均不理想,最高才达60%。笔者认为,由于本期实验于7月中旬到9月间进行,正逢对虾疾病暴发期,在换水等操作过程中,可能带进某些致病细菌而致对虾死亡率较高。

其他作者曾报导在高蛋白低糖时,存活率下降的情况^[1]。Hysmith等^[6]报导在投喂高蛋白低能及低蛋白高能的饲料时,褐对虾(*P. aztecus*)表现为较好的生长和低的存活率。本文的研究发现DP/DE过高或过低时,生长与存活同时受影响。

需要指出的是,本实验条件下,投喂第1组饲料(蛋白质含量为40%,能值为174kcal.(100g饲料)⁻¹)的中国对虾在各项指标中均处劣势。尤其对于小规格对虾,其DP/DE值为155.3mg.(kcal)⁻¹,与较佳值相差并不太大的情况下,其生长不好的原因很大一部分可能就在于饲料纤维素的过量添加(达18%)。大部分鱼虾体内不具备纤维分解酶,不能直接利用粗纤维,但

在真鲷饲料中添加3~12%的羧甲基纤维素(CMC),可以提高饲料营养价值,促进代谢能的活性^[13]。添加适量的纤维素约4.5%,可以加强肠的蠕动,对蛋白质的利用有促进作用,但添加过量,则影响对虾的正常生长^[14]。

参考文献

- 1 Andrews J W, Sick L V and Baptist G J. The influence of dietary protein and energy levels on growth and survival of penaeid shrimp. *Aquaculture*, 1972, 1: 341~347
- 2 Colvin P M. Nutritional studies on penaeid prawns: protein requirements in compounded diets for juvenile *Penaeus indicus*. *Aquaculture*, 1976, 7: 315~326
- 3 Sedgwick R W. Influence of dietary protein and energy on growth, food consumption and food conversion efficiency in *Penaeus merguensis* demand. *Aquaculture*, 1979, 16: 7~30
- 4 Cho C Y. Feeding systems for rainbow trout and other salmonoids with reference to current estimates of energy and protein requirements. *Aquaculture*, 1992, 100: 107~123
- 5 Bages M and Sloane L. Effects of dietary protein and starch levels on growth and survival of *Penaeus monodon* (Fabricius) Postlarvae. *Aquaculture*, 1981, 25: 117~128
- 6 Hysmith B T, Both J R, Cook H L, et al. A study of the effects of feeding synthetic diets to brown shrimp (*Penaeus aztecus*). In: Avault J W. Proc 3rd Annu Workshop World Mariculture Soc. Baton Rouge; Louisiana State Univ Pres, 365~388
- 7 Bromsley P J. Effects dietary protein, lipid and energy content on the growth of turbot (*Scophthalmus maximus* L.), *Aquaculture*, 1980, 19: 359~369
- 8 Nose T. Protein digestibility of several test diets in cray and prawn fish. (Tokyo;) Bull. Freshwater Fish Res Lab, 1964, (14): 23~28
- 9 Cho C Y and Kaushik S J. Nutritional energetics in fish; energy and protein utilization in rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *World Rev Nutr Diet*, 1990, 61: 132~172
- 10 Garling D L and Wilson R P. The optimum dietary protein to energy ratio for channel catfish fingerlings, *Ictalurus punctatus*. *J Nutr*, 1976, 106: 1368~1375
- 11 梁亚全,季文娟. 对虾不同发育阶段对饲料蛋白质的需求量. *海洋水产研究*, 1986, 7: 79~88
- 12 Alava V R and Lim C. The quantitative dietary protein requirements of *Penaeus monodon* juveniles in a controlled environment. *Aquaculture*, 1983, 30: 53~61
- 13 Morita K, Furuchi M and Yone Y. Effects of carboxymethylcellulose supplemented to dextrin containing diets on the growth and feed efficiency of red sea bream. *Bull Jap Soc Scient Fish*, 1982, 48: 1617~1620
- 14 徐新章,李爱杰. 中国对虾配饵中蛋白质、糖、纤维素、脂肪的适宜含量及日需要量研究. *海洋科学*, 1986, 6: 1~6

Studies on the Optimum DP/DE for Different Sizes of *Penaeus Chinensis*

Xue Min Li Aijie Dong Shuanglin Zhang Xianjuan

(Aquaculture Research Laboratory, Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003)

Abstract Studies were conducted on the optimum DP/DE (digestible protein/digestible energy) for different sizes of *P. chinensis* (0.368~0.699g; 1.025~1.525g) by using purified diets. There were 3 protein levels and 4 calorie grades at each protein level. The results indicate that large shrimps can utilize more protein than smaller ones; 145.2 and 136.4mg/kcal DP/DE values are optimum for the two sizes of shrimps to obtain highest weight gain, lowest FCR and best PER respectively. The survival rate increases with the increasing protein content in the diets.

Key words *Penaeus chinensis*; dietary; digestible protein/digestible energy (DP/DE)

海 洋 人 物

霍姆斯, A. (Arthur Holmes, 1890~1965) 英国地质学家、地球物理学家。1890年1月14日出生于英国达勒姆的希伯恩。1965年9月20日逝世于伦敦。1909年毕业于伦敦帝国学院。曾先后学习过物理、数学和地质。1911~1912年前往非洲莫桑比克考察。历任缅甸石油公司地质部主任(1921~1924)、达勒姆大学地质学教授(1924~1943)、爱丁堡大学地质学和矿物学讲座教授(1943~1965)。霍姆斯主要贡献有二:1. 1915年用放射性方法首先利用地球内部温度分布的热量计算, 提出地球绝对年龄的现代估算; 2. 与美国地球物理学家D. T. 格里格斯(David Tressel Griggs)一起提出关于解释地壳运动的学说——地幔对流学说。在海洋地质学上, 此学说可以解释海沟等现象, 60年代后该学说已成为解释板块构造运动驱动力的假说。此外, 在岩石学工艺和系统化上也有重要建树, 并曾指出岩石学与地球物理学之间的重要联系。1942年当选为英国皇家学会会员。曾获美国地质调查所授予的彭罗斯奖(1956)、维特莱森奖(1964)。主著有《岩石学术语》(1928); 《岩相学和计算方法》(1930); 《地球的年龄》(1937); 《自然地质学原理》(1944); 《放射性作用与地球运动》(1964)等。

(刘安国)