

文章编号: 1000-0615(2006)01-0056-07

中国明对虾能量代谢与生长的关系

黄国强, 董双林, 王芳, 穆迎春, 董少帅, 刘相义

(中国海洋大学海水养殖教育部重点实验室, 山东青岛 266003)

摘要: 采用能量收支推算方法, 计算了中国明对虾的呼吸能量消耗, 并计算了中国明对虾摄食配合饵料后其生长的呼吸能消耗。不同规格的中国明对虾的呼吸能与增重的关系都可以用线性方程 $R_e = r \times G + k$ 很好地描述。所有规格对虾的呼吸能(R_e)与增重(G)和体重(W)的复合关系可用方程 $R_e = r \times G + b \times W^c$ 很好地拟合。不同大小中国明对虾摄食配合饲料时每增长 1 g 湿重、1 g 干重、1 g 蛋白质、1 kJ 能量的呼吸能消耗相应范围分别为 12.660~17.785 kJ、21.600~31.292 kJ、31.572~45.537 kJ、1.089~1.453 kJ。但中国明对虾摄食不同饵料后, 单位体重增长的能耗在不同饵料投喂的对虾间存在显著差异, 并且发现这些数值都明显比鱼类高。本文对表观特殊动力作用与生长的关系进行了探讨, 并认为生长不是导致表观特殊动力作用出现的根本原因。

关键词: 中国明对虾; 生长; 表观特殊动力作用; 能量收支

中图分类号: S963 文献标识码: A

Relationship between energy metabolism and growth in *Fenneropenaeus chinensis*

HUANG Guo-qiang, DONG Shuang-lin, WANG Fang, MU Ying-chun, DONG Shao-shuai, LIU Xiang-yi

(Key Laboratory of Mariculture, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266003, China)

Abstract: The opinion that the specific dynamic action (SDA) is caused by the growth of animals dominates the studies in this field. But there are still evidences for the positive correlation between SDA and feeding. In order to investigate the relation between the growth and SDA of Chinese shrimp, *Fenneropenaeus chinensis*, three experiments were designed. In the first experiment, shrimps of four different body weight were fed with formulated diet at different ration levels for 28 d and the data of growth, food ingestion, and exuviations were acquired. In another experiment, the shrimps were fed with six different diets (fish muscle, shrimp muscle, clam muscle, polychaete worm, formulated diet, and an equal mixture of them) for 30 d and the same data as the first experiment were acquired. Then the energy budget of the shrimp in each experiment was constituted. The respiration energy consumption of Chinese shrimp was calculated using methods of reckoning from energy budget respectively and the energy cost of growth after ingesting formulated diet was calculated. It was found that the energy cost of 1 g wet weight, 1 g dry weight, 1 g protein, and 1 kJ energy body weight gain were 12.660–17.785 kJ, 21.600–31.292 kJ, 31.572–45.537 kJ, 1.089–1.453 kJ, respectively, when the shrimp fed with formulated diet. The compound relationship among body weight (W), weight gain (G), and energy consumption (R_e) was well simulated with equation $R_e = r \times G + b \times W^c$. It was inferred that the energy cost of Chinese shrimp was higher than fishes after comparing the data of the present experiment with previous studies on fishes. Significant differences were found among the energy costs of unit body growth of the shrimp fed with different feed. Shrimps fed on polychaete worm expended least energy and shrimps fed on fish flesh consumed most energy for unit body growth. It was found that food conversion efficiencies (FCE_d , FCE_p and FCR_c) were highest at polychaete worm fed shrimps and the poorest food conversion efficiencies were observed in fish flesh fed shrimp. The relationship between the apparent specific dynamic action and growth was explored. It is indicated that the energy

收稿日期: 2005-01-04

资助项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1999012011); 国家 863 课题(2002AA648010)

作者简介: 黄国强(1973-), 男, 广西平乐人, 博士, 主要从事海洋经济动物生理生态学研究。E-mail: hgqhigh@yahoo.com.cn

通讯作者: 董双林, Tel: 0532-82032827; E-mail: dongsl@ouc.edu.cn

allocated to growth was negatively related to the apparent specific dynamic action, thus indicating that the growth of animals was not the direct causal factor for apparent specific dynamic action. A credible explanation of the nature of SDA is still in need. To achieve this explanation, further studies to understand the energy cost of feeding and the energy expense of growth simultaneously must be conducted.

Key words: *Fenneropenaeus chinensis*; growth; apparent specific dynamic action; energy budget

动物摄食后能量消耗增加, 这种与动物摄食相关的能量消耗(RF)一般假定由以下几种因素引起: 与摄食相关的身体位移活动; 撕咬、消化和吸收活动; 被吸收物质的化学转变^[1]。并且, 一般认为 RF 中大部分为蛋白质消化、吸收和消化产物的贮存过程中氨基酸脱氨基, 以及含氮排泄物的合成过程所用的能量, 并将其定义为特殊动力作用(SDA)^[1]。由实验数据推算出的 SDA 往往假定活动代谢不随摄食而变化, 所得结果称为表观特殊动力作用(apparent specific dynamic action, SDA)^[2,3], 或将两部分代谢作为同一组分进行测定, 称为摄食代谢(feeding metabolism)^[4,5]。

在对 SDA 的研究中发现, 对于同一种饵料来说 SDA 占摄入饵料的能量的比例是固定的, 即 SDA 与摄入饵料的数量之间具有线性关系, 直线的斜率即代表单位摄食量的 SDA 产生量^[6,7], 并与饵料的蛋白质含量有正相关关系^[8-13]。但有些学者指出 SDA 可代表与生长有关的能耗, 即 $RF = rP$ (式中 P 表示生长, r 是单位生长的能量消耗)^[9,14-16]。随后很多研究的结果表明, 动物的 SDA 与生长之间存在着正相关关系, 其中大多数是线性关系, 即单位增重的呼吸能量消耗是一个相对稳定的值^[11,17,18]。但在这些有关生长——耗能或蛋白质合成——耗能关系的研究中, 对实验动物都采用了投喂相同或相似食谱的不同摄食水平处理^[7,17,19-21], 而在很多研究中发现, 动物的生长与摄食量之间存在显著的正相关, 并且有些为线性关系^[22-26], 因此在类似的实验中得到 SDA 与生长或蛋白质合成速度之间存在线性关系也就不足以说明生长或蛋白质合成是导致 SDA 现象的根本原因。本文采用不同饵料投喂中国明对虾, 研究其能量代谢与生长的关系, 对表观 SDA 与生长的关系进行探讨。

1 材料与方法

1.1 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。对虾按实验设计的密度放入水族箱(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, 每两天换水 1/2, 所用海水用筛绢过滤。水族箱内溶氧保持在 5.5 mg·L⁻¹ 以上, 海水温度为 (25 ± 0.5) °C, 盐度为 30~32, pH 值为 7.8 ± 0.3。光照周期为 14 L: 10 D。

1.2 实验用虾来源及驯化

实验所用对虾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两次(早上 6:00 和晚上 6:00), 投饵 3 h 后清除水族箱内的残饵和粪便。

1.3 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, 分析对虾初始成分。实验用饵料也分别随机取样 3 个, 作为分析饵料成分的样品。投喂的饵料都精确称重, 投喂后 3 h 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。每天及时收集对虾排出的粪便。及时收集对虾的蜕皮。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 °C 下烘干至恒重, 计算对虾和饵料样品的水分含量。所有样品用凯氏定氮法测定氮含量并换算成粗蛋白质含量(凯氏氮 × 6.25)。对虾和饵料的粗脂肪含量用索氏抽提法测定。样品的灰份含量用马福炉在 550 °C 下燃烧至恒重测得。样品的能值用 PARR1281 型氧弹热量计测定。每个样品测定 3 次。

1.4 实验设计

不同摄食水平的对虾生长 实验共持续 28 d。4 个规格(平均湿重分别为 2.988 ± 0.200、7.960 ± 0.450、14.177 ± 0.868、19.012 ± 1.413 g)对虾每天投喂的配合饲料干重与对虾湿重的比例设 5 个投喂水平, 分别为 0、0.5%、1.0%、1.5% 和过量。每隔 7 天用精确到 0.1 mg 的电子天平称量对虾重量, 并据此调整投喂的饲料量, 对虾最后的摄食水平以饲料实际摄入量计算。每一处理设 6 个重复, 每一水族箱中放养对虾 1 尾。水族箱

按完全随机化区组设计进行排列。

摄食不同饵料的对虾生长 实验共持续 30 d。实验共设 6 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(FM)、虾肉(SM)、蛤蜊肉(CM)、沙蚕(CW)和配合饲料(FD), 另一处理则混合投喂前 5 种饵料(MD), 每一种都过量并且等量(干重)投喂。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

表 1 实验用饵料的生化组成和能量含量

Tab. 1 Biochemical composition and energy content of experimental diets

mean ± SE

成分 composition	饵料 diets					
	FF	SF	CF	PW	FD	MD ²
水分(%) moisture	77.23 ± 0.38	80.33 ± 1.27	79.35 ± 3.15	74.18 ± 0.80	7.70 ± 0.15	76.57 ± 0.10
蛋白质(%) protein	83.98 ± 1.12	84.13 ± 0.65	68.49 ± 0.59	63.73 ± 0.44	42.57 ± 0.50	71.14 ± 0.18
脂肪(%) lipid	5.18 ± 0.01	5.00 ± 0.01	5.96 ± 0.01	16.32 ± 0.03	9.93 ± 0.02	8.96 ± 0.02
灰份(%) ash	6.41 ± 0.02	3.2 ± 0.01	5.38 ± 0.02	6.89 ± 0.02	10.75 ± 0.03	5.77 ± 0.02
能量 energy	22.15 ± 0.24	22.95 ± 0.04	19.89 ± 0.05	21.66 ± 0.09	19.23 ± 0.09	21.02 ± 0.03
能蛋比(E/P, kJ·g ⁻¹)	26.38 ± 0.14	27.28 ± 0.17	29.17 ± 0.20	33.99 ± 0.17	45.20 ± 0.70	29.54 ± 0.11
脂蛋比(L/P)	0.061 ± 0.001	0.059 ± 0.001	0.087 ± 0.001	0.256 ± 0.002	0.233 ± 0.003	0.126 ± 0.001

注: 除水分外, 其它成分均以干重为准

Notes: Except the moisture, all compositions were calculated based on dry weight

1.6 数据计算

对虾的增重(G, g)、摄食量(I, g)和饵料转化效率(FCE, %) 计算公式分别如下:

$$G = W_t - W_0$$

$$I = D_p - D_r \times E_d$$

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

其中对虾体重为湿重(W), 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; 饵料均为干重, D_p 为投饵量, D_r 为残饵量, E_d 为残饵溶失校正系数; T 为实验持续时间。相应地, 所有样品以干物质(d)、蛋白质(p)和能量(e)表示的对虾的增重(G, g)、摄食量(I, g)和饵料转化效率(FCE, %) 也按以上公式进行了计算。

能量收支方程的计算方法^[27, 28]:

摄食能 $C_e =$ 摄食量 × 饵料能值

生长能 $G_e =$ 结束虾总能量(FS_e) - 初始虾总能量(IS_e)

粪能 $F_e =$ 粪便干重(F_d) × 粪便能值

蜕皮能 $E_e =$ 蜕皮干重 × 蜕皮能值

排泄能 $U_e = U_N \times 24.83$

式中, U_N 为排泄氮, 其计算方法: $U_N = C_N - G_N - F_N - E_N$, 式中 C_N 、 G_N 、 F_N 、 E_N 分别为摄食氮、生

1. 530 ± 0.047 g (mean ± SD) 的对虾 4 尾。

每一处理设 4 个重复, 共用 24 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 实验用饵料成分及准备

实验用的 5 种饵料, 即沙丁鱼肌肉(FF)、鹰爪虾肌肉(SF)、菲律宾蛤仔足肌(CF)、沙蚕(PW)和配合饲料(FD), 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。各种饵料的营养和能量特征见表 1。

长氮、粪便氮和蜕皮氮, 24.83 指对虾排泄 1g 氮(以氮的形态)损失的能量为 24.83 kJ^[29]。

呼吸能(R_e , kJ) 根据 $R_e = C_e - (G_e + F_e + E_e + U_e)$ 进行计算^[27]。

1.7 数据的统计分析

对数据的统计分析用 SPSS10.0 进行。对数据进行了单因子方差分析和回归分析, 回归分析采用曲线拟合方式进行。对不同数据间进行了 DUNCAN 多重比较, 以 $P < 0.05$ 作为差异显著的置信限。

2 结果

2.1 不同摄食水平下中国明对虾呼吸能与增重的关系

不同规格中国明对虾的呼吸能与增重的关系都可以用线性方程 $R_e = r \times G + k$ 描述, k 表示维持体重的呼吸能, 而 r 表示单位身体增重的呼吸能(kJ)。其中 k 值随对虾体重的增加而增加, 并且在同一规格中当体重的表示形式不同时略有差别(表 2)。当增重以湿重(g)形式表示时 r 值随对虾体重的增加而增大, 而以干重(g)、蛋白质(g)、能量(kJ)表示增重时, r 值基本上随对虾体重增加

而减小。不同规格中以湿重(g)、干重(g)、蛋白质(g)、能量(kJ)表示增重时 r 值的相应范围为 12.660~17.785、21.600~31.292、31.572~45.537、1.089~1.453 kJ。对虾呼吸能与增重和体重的关系可用方程 $R_e = r \times G + b \times W^c$ 很好

地拟合,其中 r 表示身体单位增重的呼吸能系数,而 b 和 c 则是维持对虾体重的参数,与增重量无关。当增重 G 分别以湿重(g)、干重(g)、蛋白质(g)、能量(kJ)表示时 r 值分别为 13.935、21.967、32.162 和 1.065 kJ(表 3)。

表 2 呼吸能 R_e (由不同摄食量的对虾的能量收支计算)与增重 G 的关系

Tab. 2 Relationship between R_e (Calculated from energy budget of different ration sizes, kJ) and weight gain

平均体重(g) average wet body weight	增重表示方式 terms of weight gain	模型 models	参 数 parameters		R^2	P
			r	k		
2.988±0.200	G_w	$R_e = r \times G_w + k$	12.660±1.267	14.529±0.867	0.738	< 0.01
	G_d	$R_e = r \times G_d + k$	27.220±3.389	20.441±0.957	0.645	< 0.01
	G_p	$R_e = r \times G_p + k$	39.256±4.473	20.591±0.905	0.685	< 0.01
	G_e	$R_e = r \times G_e + k$	1.311±0.160	21.319±0.980	0.654	< 0.01
7.960±0.450	G_w	$R_e = r \times G_w + k$	15.080±3.232	38.081±2.967	0.417	< 0.01
	G_d	$R_e = r \times G_d + k$	31.292±5.810	40.265±2.722	0.491	< 0.01
	G_p	$R_e = r \times G_p + k$	45.537±8.015	43.019±2.677	0.519	< 0.01
	G_e	$R_e = r \times G_e + k$	1.453±0.293	41.354±2.837	0.448	< 0.01
14.177±0.868g	G_w	$R_e = r \times G_w + k$	14.474±1.994	59.567±2.245	0.640	< 0.01
	G_d	$R_e = r \times G_d + k$	21.600±3.300	64.771±2.880	0.591	< 0.01
	G_p	$R_e = r \times G_p + k$	31.572±4.602	64.102±2.711	0.614	< 0.01
	G_e	$R_e = r \times G_e + k$	1.089±0.150	66.402±2.814	0.639	< 0.01
19.012±1.413	G_w	$R_e = r \times G_w + k$	17.785±3.897	77.791±4.441	0.406	< 0.01
	G_d	$R_e = r \times G_d + k$	22.608±5.221	90.702±5.854	0.380	< 0.01
	G_p	$R_e = r \times G_p + k$	32.587±7.106	90.092±5.555	0.409	< 0.01
	G_e	$R_e = r \times G_e + k$	1.097±0.213	88.365±4.959	0.468	< 0.01

注: R_e 表示呼吸能消耗(KJ); G_w 、 G_d 、 G_p 、和 G_e 分别为以湿重、干重、蛋白质、能量表示的增重

Notes: R_e was the energy consumption of respiration (kJ); G_w , G_d , G_p , and G_e were shrimp body weight gain in terms of wet weight (g), dry weight (g), protein (g), and energy (kJ)

表 3 呼吸能 R_e 与增重 G 和体重 W 的复合关系

Tab. 3 Relationship between R_e and diet ingested and shrimp body weight

实验方法 methods of experiment	增重表示方式 terms of body weight gain	模型 models	参 数 parameters			R^2	P
			r	b	c		
不同摄食水平实验计算 calculated from energy budget of different ration sizes	G_w	$R_e = r \times G_w + b \times W^c$	13.935±1.343	5.561±0.995	0.898±0.066	0.761	< 0.05
	G_d	$R_e = r \times G_d + b \times W^c$	21.967±2.060	6.141±0.958	0.910±0.058	0.767	< 0.05
	G_p	$R_e = r \times G_p + b \times W^c$	32.162±2.876	6.676±0.989	0.879±0.055	0.777	< 0.05
	G_e	$R_e = r \times G_e + b \times W^c$	1.065±0.091	7.005±0.999	0.859±0.052	0.789	< 0.05
不同饵料投喂实验计算 calculated from energy budget of different diet treatments	G_w	$R_e = r \times G_w + b \times W^c$	12.003±1.526	10.824±1.329	1.071±0.236	0.508	< 0.05
	G_d	$R_e = r \times G_d + b \times W^c$	64.993±17.521	28.442±7.231	-0.521±0.133	0.552	< 0.05
	G_p	$R_e = r \times G_p + b \times W^c$	110.615±23.539	40.434±7.384	-1.135±0.326	0.568	< 0.05
	G_e	$R_e = r \times G_e + b \times W^c$	2.950±0.631	26.620±4.623	-0.295±0.072	0.557	< 0.05

注: R_e 表示呼吸能消耗(kJ); W 表示对虾湿重(g); G_w 、 G_d 、 G_p 、和 G_e 分别为以湿重、干重、蛋白质、能量表示的增重

Notes: R_e was the energy consumption of respiration (kJ); W was wet shrimp body weight (g); G_w , G_d , G_p , and G_e were shrimp body weight gain in terms of wet weight (g), dry weight (g), protein (g), and energy (kJ)

2.2 不同摄食水平下中国明对虾增重与摄食量的关系

不同规格中国明对虾的增重与摄食的关系都为线性关系,可用方程 $G = \alpha \times I + \beta$ 很好地描述(表 4)。其中 β 表示对虾在饥饿状态下的体重损

失,随对虾规格变大而增加。在不同规格的对虾中, G 以湿重(g)、干重(g)、蛋白质(g)、能量(kJ)表示时 α 值的范围相应地为 0.368~0.636、0.227~0.287、0.163~0.202、4.588~6.048。

表4 增重与摄食量(干重,g)的关系

Tab. 4 Relationship between weight gains and diet ingestion (dry weight, g)

平均体重(g) average wet body weight	增重表示方式 terms of weight gain	模型 models	参数 parameters		R ²	P
			α	β		
2.988±0.200	G _w	G _w = α × I _d + β	0.636±0.037	-0.428±0.054	0.894	<0.01
	G _d	G _d = α × I _d + β	0.270±0.019	-0.388±0.028	0.849	<0.01
	G _p	G _p = α × I _d + β	0.196±0.013	-0.282±0.018	0.874	<0.01
	G _e	G _e = α × I _d + β	5.695±0.384	-8.811±0.561	0.862	<0.01
7.960±0.450	G _w	G _w = α × I _d + β	0.402±0.058	-0.954±0.194	0.616	<0.01
	G _d	G _d = α × I _d + β	0.227±0.025	-0.625±0.083	0.738	<0.01
	G _p	G _p = α × I _d + β	0.163±0.017	-0.508±0.056	0.760	<0.01
	G _e	G _e = α × I _d + β	4.588±0.549	-13.331±1.825	0.704	<0.01
14.177±0.868 g	G _w	G _w = α × I _d + β	0.439±0.043	-1.897±0.160	0.781	<0.01
	G _d	G _d = α × I _d + β	0.287±0.026	-1.491±0.097	0.807	<0.01
	G _p	G _p = α × I _d + β	0.202±0.017	-1.017±0.065	0.824	<0.01
	G _e	G _e = α × I _d + β	6.048±0.481	-32.176±1.795	0.844	<0.01
19.012±1.413	G _w	G _w = α × I _d + β	0.368±0.038	-1.726±0.210	0.759	<0.01
	G _d	G _d = α × I _d + β	0.265±0.025	-1.873±0.135	0.799	<0.01
	G _p	G _p = α × I _d + β	0.169±0.022	-1.259±0.118	0.676	<0.01
	G _e	G _e = α × I _d + β	5.564±0.617	-38.308±3.384	0.735	<0.01

注: G_w、G_d、G_p和 G_e 分别为以湿重、干重、蛋白质、能量表示的增重; I_w、I_d、I_p和 I_e 分别为以湿重、干重、蛋白质、能量表示的摄食量

Notes: G_w, G_d, G_p, and G_e were shrimp body weight gain in terms of wet weight (g), dry weight (g), protein (g), and energy (kJ); I_w, I_d, I_p, and I_e were food ingestion in terms of wet weight (g), dry weight (g), protein (g), and energy (kJ)

2.3 摄食不同饲料的中国明对虾的呼吸能与增重的关系

摄食不同饲料的对虾呼吸能与增重的关系用公式 R_e = r × G + b × W^c 进行拟合时得不到稳定的 b 和 c 值(表 3)。假设摄食不同饲料的对虾维持体重的代谢水平相同, 则单位增重的表观 SDA 计算公式为: r = (R_e - b × W^c) / G, 式中 b 和 c 采用表中不同摄食量的呼吸能与增重和体重拟合模

型中的相应的值, 所得结果见表 5。对虾摄食不同饲料后单位增重的表观 SDA 以沙蚕最低, 而鱼肉最高。

2.4 中国明对虾摄食不同饲料后的食物转化效率

中国明对虾摄食不同饲料后, 转化效率也存在显著差异(表 6)。其中以沙蚕的转化效率最高, 超过 21%, 鱼肉最低, 不到 5%。

表 5 不同饲料处理中单位增重所引起的特殊动力作用

Tab. 5 SDA (kJ) of per unit weight gain in different diet treatments

增重的表示方式和单位 terms and units of weight gain	饲料 diets					
	FF	SF	CF	PW	FD	MD
湿重(g) wet weight	41.09±11.74 ^b	38.46±12.50 ^b	27.92±2.34 ^{ab}	8.41±1.08 ^a	20.44±3.87 ^b	28.67±1.74 ^{ab}
干重(g) dry weight	221.60±37.30 ^c	169.62±25.86 ^c	105.61±12.05 ^b	29.56±5.04 ^a	68.16±9.59 ^b	95.51±3.71 ^b
蛋白(g) protein	311.61±59.98 ^c	305.33±62.17 ^c	57.29±17.47 ^b	43.32±7.77 ^a	112.75±17.04 ^{ab}	145.19±6.25 ^b
能量(kJ) energy	15.11±3.63 ^b	17.01±5.57 ^b	5.08±0.54 ^a	1.33±0.24 ^a	3.31±1.21 ^a	4.55±0.19 ^a

注: 同一行中没有相同字母上标的数值相互之间差异显著

Notes: Values without same letter in the same line are significantly different from each other

表 6 不同饲料处理的饲料转化效率

Tab. 6 FCE (%) in different feed treatments

(%, mean±SE)

转化效率表示方式 terms of FCE	饲料 feed					
	FF	SF	CF	PW	FD	MD
干重 FCE _d dry weight	4.409±0.891 ^a	5.861±0.1087 ^a	10.759±0.931 ^b	22.861±1.627 ^c	11.355±1.330 ^b	12.054±0.428 ^b
蛋白质 FCE _p protein	3.672±0.705 ^a	3.811±0.890 ^a	10.215±0.902 ^b	22.867±1.651 ^d	15.458±2.071 ^c	10.981±0.408 ^b
能量 FCE _e energy	2.972±0.0773 ^a	2.655±0.961 ^a	10.807±0.906 ^b	21.390±1.491 ^c	11.288±1.310 ^b	11.764±0.410 ^b

注: 没有相同字母上标的数值相互之间差异显著

Notes: Values without same letter in the same line are significantly different from each other

3 讨论

有学者指出 SDA 可代表与生长有关的能耗, 即 $R_f = rP$ (P 表示生长, r 是单位生长的能量消耗), 认为表观 SDA 与生长是相互作用的, 高的生长率将被反映在高的代谢率上, 使动物生长良好的食物也应使表观 SDA 高^[9, 14-16]。Kierboe 等将大西洋鲱 (*Clupea harengus*) 的耗氧率分为两部分: 一部分与体重成比例, 而另一部分则与生长成比例关系^[17]。Carter 和 Brafield 对草鱼的表观 SDA 与生长的关系的研究中发现, 表观 SDA 与特定生长率 (SGR)、蛋白质和能量的积累之间都存在着显著的正相关关系^[11]。其他作者在测定了表观 SDA 和蛋白质合成速率后, 也发现表观 SDA 水平与蛋白质的合成速率之间存在着显著的正相关关系^[18, 30, 31]。Jobling^[16] 根据 Hogendoom 在 1983 年发表的有关胡子鲶 (*Clarias lazera*) 的数据整理的结果表明, 不同大小不同摄食量的个体的干重增量 (G , mg) 与耗氧量 (CO_2 , mL) 之间存在如下线性关系: $CO_2 = a + bG$, 并且 b 的范围为 0.359~0.554, 平均值为 0.463, 即每增长 1mg 干重需消耗 0.463 mL O_2 ^[1], 若换算为能量 [1 mol O_2 (32 g) 为 22.4×10^3 mL, O_2 的平均氧热价按 $13.54 \text{ kJ} \cdot \text{g}^{-1}$ 计], 则为 8.956 J; 而积累 1 mg 蛋白质需要耗氧 758 mL, 换算为能量则为 14.662 J。谢小军和孙儒泳在南方鲇 (*Silurus meridionalis*) 的研究中得到的代谢率与生长速度之间的线性回归关系表明: 南方鲇每生长 1 g 体重需消耗 2 288.2 J 的呼吸能^[7]。在本实验中, 不同摄食量的对虾的呼吸能 (R_e) 和增重 (G) 及体重间的关系可用模型 $R_e = r \times G + b \times W^c$ 很好地拟合 (表 5), 不同规格的对虾的呼吸能 (R_e) 和增重 (G) 的关系也可用线性方程 $R_e = r \times G + k$ 很好地描述 (表 4), 表明在摄食同一种饲料的中国明对虾中, 呼吸耗能与生长之间的确存在一种显著的线性关系, 并且每增长 1 g 湿重、干重、蛋白质和 1 kJ 能量的相应能量消耗为 12.660~17.785 kJ、21.600~31.292 kJ、31.572~45.537 kJ、1.089~1.453 kJ (表 4), 在模型 $R_e = r \times G + b \times W^c$ 中的相应值为 13.935 kJ、21.967 kJ、32.462 kJ、1.065 kJ (表 5)。显然, 中国明对虾的身体生长的能量代价比鱼类要昂贵得多, 这由于对虾类生长过程中同时伴随着节律性的蜕皮活动, 不仅在其蜕下的皮中含有一部分能量, 而且蜕

皮过程中的呼吸能也比正常状态下有所提高^[32-34], 因而其生长的能量消耗代价可能显著高于鱼类。

若表观 SDA 代表生长的能耗, 则对于生活于相同理化环境的动物来说, 无论吃什么食物, 单位体重增长的能耗应该大致相同。但得出表观 SDA 与生长为正线性相关的实验研究大多采用了相同或相似食谱的方法, 并没有对动物摄食不同食物后表观 SDA 与生长之间的关系进行探讨^[7, 17, 19-21]。在本实验中, 中国明对虾摄食不同饵料后, 呼吸能与增重之间没有稳定的回归关系, 即不能得出表观 SDA 与增重的线性关系。在假设摄食不同饵料的对虾维持体重的代谢水平相同后, 计算得到增重的能耗在摄食不同饵料的对虾之间存在显著差异。因此, 表观 SDA 与生长的正线性关系可能只在动物摄食相同或相似食物的情况下成立, 而在这种情况下, 动物的生长与摄食量也成正相关^[22-26]。所以基于类似实验的结果并不足以证明表观 SDA 与生长的正线性关系, 要阐明表观 SDA 与生长的关系和 SDA 的本质, 需要更多的实验研究结果进行分析。在本实验中, 中国明对虾摄食不同饵料后单位增重的表观 SDA 与饵料的转化效率呈现负相关关系, 表明饵料分配于生长的能量与表观 SDA 可能是相互竞争的, 即高 SDA 的饵料会导致分配给生长的能量减少。

参考文献:

- [1] Tytler P, Calow P. Fish Energetics: New Aspects[M]. Groom Helm, London, 1985. 213-230.
- [2] Tyler A V. Evidence of the assumption of independence between gastric evacuation rate and swimming activity using Atlantic cod, *Gadus morhua* [J]. J Fish Res Board Can, 1977, 34: 2411-2413.
- [3] Soofiani N M, Hawkins A D. Energetic costs at different levels of feeding in juvenile cod, *Gadus morhua* L. [J]. Journal of Fish Biology, 1982, 21: 577-592.
- [4] Brett J R. Feeding metabolic rates of young sockeye salmon, *Oncorhynchus nerka*, in relation to ration level and temperature [J]. Fish Mar Serv Res Tech Rep, 1976, 675: 43.
- [5] Cui Y, Wootton R J. The metabolic rate of the minnow, *Phoxinus phoxinus* (L.) (Pisces: Cyprinidae), in relation to ration, body size and temperature [J]. Functional Ecology, 1988, 2: 157-161.
- [6] Hamada A, Maeda W. Oxygen uptake due to specific dynamic action of carp, *Cyprinus carpio* [J]. Japanese Journal of Limnology, 1983, 44(3): 225-239.

- [7] 谢小军, 孙儒泳. 南方鲇的日总代谢和特殊动力作用的能量消耗[J]. 水生生物学报, 1992, 16(3): 200–207.
- [8] Nelson S G, Knight A W, Li H W. The metabolic cost of food utilization and ammonia production by juvenile *Macrobrachium rosenbergii* (Crustacea: Palaemonidae) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology, 1977, 57A: 67–72.
- [9] Jobling M, Davis P S. Effects of feeding on metabolic rate, and the specific dynamic action in plaice, *Pleuronectes platessa* L. [J]. Journal of Fish Biology, 1980, 16: 629–638.
- [10] Hewitt D R, Iving M G. Oxygen consumption and ammonia excretion of the brown tiger prawn *Penaeus esculentus* fed diets of varying protein content [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A, 1990, 96(3): 373–378.
- [11] Carter C G, Brafield A E. The relationship between specific dynamic action and growth in grass carp, *Ctenopharyngodon idella* (Val.) [J]. Journal of Fish Biology, 1992, 40(6): 895–907.
- [12] Somanath B, Palavesam A. Effect of isonitrous and isocaloric diets on specific dynamic action (SDA) of the fish *Labeo rohita* (Ham.) [A]. Aquaculture 2001: Book of Abstracts [C]. 2001, 509.
- [13] Thor P, Cervetto G, Besiktepe S, et al. Influence of two green algal diets on specific dynamic action and incorporation of carbon into biochemical fractions in the copepod *Acartia tonsa* [J]. Journal of Plankton Research, 2002, 24(4): 293–300.
- [14] Ashworth A. Metabolic rates during recovery from protein-calorie malnutrition: the need for a new concept of specific dynamic action [J]. Nature, 1969, 223: 407–409.
- [15] Jobling M. The influence of feeding on metabolic rate of fish: a short review [J]. Journal of Fish Biology, 1981, 18: 385–400.
- [16] Jobling M. Toward an explanation of specific dynamic action (SDA) [J]. Journal of Fish Biology, 1983, 23: 549–555.
- [17] Kørboe T, Munk P, Richardson K. Respiration and growth of larval herring *Clupea harengus*: relation between specific dynamic action and growth efficiency [J]. Marine Ecology-Progress Series, 1987, 40: 1–10.
- [18] Thor P. Relationship between specific dynamic action and protein deposition in calanoid copepods [J]. Journal of Experimental Biology and Ecology, 2000, 245: 171–182.
- [19] Freeman B M. The effect of diet and breed upon the oxygen requirements of the domestic fowl during the first fortnight of post-embryonic life [J]. Britain Poultry Science, 1964, 5: 263.
- [20] Brooke O G, Ashworth A. The influence of malnutrition on the postprandial metabolic rate and respiratory quotient [J]. Britain Journal of Nutrition, 1972, 27: 407.
- [21] Hogendoom H. Growth and production of African catfish, *Clarias lazera* (C. and V.) III. Bioenergetic relations of body weight and feeding level [J]. Aquac, 1983, 35: 1–7.
- [22] Boehlert G W, Yoklavich M M. Effects of temperature, ration, and fish size on growth of juvenile black rockfish, *Sebastes melanops* [J]. Environ Biol Fish, 1983, 8: 17–28.
- [23] Bartley D M, Carlberg J M, van Olst J C, et al. Growth and conversion efficiency of juvenile American lobsters (*Homarus americanus*) in relation to temperature and feeding level [A]. Proceeding of the eleventh annual meeting. World Mariculture Society [C]. New Orleans, Louisiana, 1980. 355–368.
- [24] Sedgwick R W. Effects of ration size and feeding frequency on the growth and food conversion of juvenile *Penaeus merguensis* de Ma [J]. Aquac, 1979, 16: 279–298.
- [25] Gu H, Anderson A J, Mather P B, et al. Effect of feeding level and starvation on growth and water and protein content in juvenile redclaw crayfish, *Cherax quadricarinatus* (von Martens) [J]. Marine and Freshwater Research, 1996, 47(5): 745–748.
- [26] Xie X J, Sun R Y. The bioenergetic of the southern catfish (*Silurus meridionalis* Chen): growth as a function of ration level, body weight and temperature [J]. Journal of Fish Biology, 1992, 40: 719–730.
- [27] Klein Breteler W C M. Food consumption, growth and energy metabolism of juvenile shore crab (*Carinus maenas*) [J]. Netherlands Journal of Sea Research, 1975, 9: 255–272.
- [28] Levine D M, Sulkin S D. Partitioning and utilization of energy during the larval development of the xanthid crab, *Rithropanopeus harrisi* (Gould) [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1979, 40: 247–257.
- [29] Elliott J M. Energy loss in the waste products of brown trout (*Salmo trutta* L.) [J]. Journal of Animal Ecology, 1976, 45(2): 561–580.
- [30] Owen S F. Meeting energy budgets by modulation of behavior and physiology in the eel (*Anguilla anguilla* L.) [J]. Comparative Biochemistry and Physiology Part A, 2001, 128: 631–644.
- [31] Thor P. Specific dynamic action and carbon incorporation in *Calanus finmarchicus* copepodites and females [J]. Journal of Experimental Biology and Ecology, 2002, 272: 159–169.
- [32] Penkoff S J, Thurberg F P. Changes in oxygen consumption of the American lobster, *Homarus americanus*, during the molt cycle [J]. Comparative Biochemistry and physiology, 1982, 72A(4): 621–622.
- [33] Stem S, Cohen D. Oxygen consumption and ammonia excretion during the molt cycle of the freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* (de Man) [J]. Comparative Biochemistry and physiology, 1982, 73B(3): 417–419.
- [34] Dall W. Estimation of routine metabolic rate in a penaeid prawn, *Penaeus esculentus* Haswell [J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1986, 96: 57–74.