

## 虾夷扇贝动态能量收支模型参数的测定

张继红<sup>1,2\*</sup>, 吴文广<sup>1</sup>, 徐东<sup>1</sup>, 任黎华<sup>1</sup>, 牛亚丽<sup>1</sup>, 赵学伟<sup>3</sup>

(1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东青岛 266071;

2. 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 266200;

3. 獐子岛集团股份有限公司, 辽宁大连 116001)

**摘要:** 本研究以虾夷扇贝为实验生物, 介绍了动态能量收支(dynamic energy budget, DEB)模型5个关键基本参数的测定及计算方法, 分析了方法的利弊及注意事项, 为贝类DEB模型参数的准确获取提供参考方法。采用壳长与软体部湿重回归法计算虾夷扇贝的形状系数 $\delta_m$ ; 采用静水法测定不同温度条件下虾夷扇贝的呼吸耗氧率, 计算阿伦纽斯温度 $T_A$ 参数; 采用饥饿法测定、计算单位时间单位体积维持生命所需的能量 $[\dot{P}_M]$ 、形成单位体积结构物质所需的能量 $[E_G]$ 和单位体积最大储存能量 $[E_M]$ 3个参数。室内饥饿实验持续60 d, 直至呼吸耗氧率及软体部干重基本保持恒定。结果显示, 壳长( $SL$ )与软体部湿重( $WW$ )的回归关系式为 $WW=0.0118SL^{3.4511}$  ( $R^2=0.9365$ ), 根据公式 $V=(\delta_m L)^3$ , 对软体部湿重的立方根和壳长进行线性回归, 所得的斜率即为形状系数 $\delta_m$ 值( $\delta_m=0.32$ ); 获得不同规格的虾夷扇贝耗氧率与水温(热力学温度, K)倒数的线性回归关系, 线性回归方程斜率的绝对值为阿伦纽斯温度 $T_A$ , 平均为 $(4160\pm 767)$  K。饥饿实验结束时, 软体部干重和呼吸耗氧率分别降低了56%和81%。虾夷扇贝的耗氧率稳定在 $0.17 \text{ mg}/(\text{ind}\cdot\text{h})$ , 经计算获得 $[\dot{P}_M]=25.9 \text{ J}/(\text{cm}^3\cdot\text{d})$ ; 饥饿持续30天之后, 虾夷扇贝软体部干重基本维持在 $(0.25\pm 0.01)\text{g}$ , 经计算获得 $[E_G]=3160 \text{ J}/\text{cm}^3$ ,  $[E_M]=2030 \text{ J}/\text{cm}^3$ 。动态DEB理论是基于能量代谢的物理、化学特性而建立的, 体现了生物能量代谢的普遍性规律, 能够反映摄食获取能量在不同发育生长阶段的能量分配情况。但是, DEB模型参数的测定及计算比较复杂。基本参数的准确获取将影响其他参数以及模型的准确性。本研究为虾夷扇贝DEB模型的构建奠定基础。

**关键词:** 虾夷扇贝; 动态能量收支; 模型参数评估

**中图分类号:** Q 148; S 917.4

**文献标志码:** A

养殖生物的个体能量学研究, 是种群生物能量学及生态系统动力学的基础<sup>[1]</sup>。自1986年Kooijman<sup>[2]</sup>首次提出基于k-rule的个体动态能量收支(dynamic energy budget, DEB)理论后, DEB模型成功用于贝类、鱼类等多种生物的能量学研究, 已建立了贻贝(*Mytilus edulis*; *M. galloprovincialis*)、长牡蛎(*Crassostrea gigas*)、蛤类(*Macoma balthica*; *Cerastoderma edule*)等多种养殖贝类的DEB模型<sup>[3-9]</sup>。DEB模型主要描述生物个体通过摄

食获取能量及其在不同发育生长阶段的主要生理机能中(维持、生长和繁殖)的能量分配, 可用于预测个体的软体部、壳高、性腺等的生长变化<sup>[10-11]</sup>, 已成功应用于种群动力学研究, 为贝类养殖及渔业管理提供指导<sup>[12-13]</sup>; 能通过饵料的可获得性预测养殖密度对生长的影响, 评估海域的养殖容量<sup>[14-15]</sup>。

DEB理论是基于能量代谢的物理、化学特性而建立的<sup>[2]</sup>。其优点是体现了生物能量代谢的普

收稿日期: 2015-08-11 修回日期: 2015-12-08

资助项目: 国家科技支撑计划(2011BAD13B06); 国家自然科学基金(41276172; 41076111); 黄海水产研究所基本科研业务费(2060302201517102-2)

通信作者: 张继红, E-mail: zhangjh@ysfri.ac.cn

遍性规律。DEB模型不仅能够反映生物用于生长的能量, 量化能量在整个生活史阶段的能量分配, 包括用于贝壳、性腺发育等方面的能量, 而且, 可以非常方便地应用于不同的种类研究、不同海域条件等, 使模型的应用范围更为广泛, 操作更为便捷。但是, DEB模型参数的测定及计算比较复杂。模型参数包括基本参数和复合参数2大类, 复合参数是由基本参数组成的。基本参数的准确获取将影响其他参数及模型的准确性。本研究所拟测定的形状系数、阿伦纽斯温度 $T_A$ 以及 $[\dot{p}_M]$ 、 $[E_G]$ 、 $[E_M]$ 都为DEB模型的基本参数。DEB模型所用的单位为单位表面积或者单位体积, 而不是我们常用的单位质量或者单位个体。这就需要有一个形状系数 $\delta_m$ 来转换。 $\delta_m$ 为贝壳的形状系数, 反映贝壳长度与贝类结构物质的关系。虽然DEB模型是目前国际上的研究热点, 但是我国在这方面的研究尚未见报道。

虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)原主产于俄罗斯、日本、朝鲜海域, 属冷水性种类, 自1980年引入我国北方以来, 已经成为我国北方重要的海水养殖品种之一。随着养殖规模和密度的不断扩大, 养殖区自身污染严重, 养殖生物生长缓慢、病害频发、死亡率剧增, 造成了巨大的经济损失, 威胁到虾夷扇贝养殖产业的生存和发展<sup>[16]</sup>, 迫切需要养殖容量的理论指导。因此, 本研究以虾夷扇贝为实验生物, 介绍了5个基本参数的测定方法, 给出了虾夷扇贝DEB模型所需的5个基本参数, 为虾夷扇贝DEB模型的构建奠定基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 形状系数(Shape coefficient, $\delta_m$ )的获得

虾夷扇贝分别于6、11月取自獐子岛养殖海域, 共计116个扇贝。分别测定虾夷扇贝的壳长及软体部湿重。壳长( $L$ )用游标卡尺(日本三丰, CD-6"CSX, 精度0.01mm)测量; 贝类的重量采用电子天平(梅特勒-托利多仪器有限公司, PL2002, 精度0.01 g)称量, 软体部湿重为剥离的壳内全部组织的鲜重。假设软体部的比重为 $1 \text{ g/cm}^3$ <sup>[3]</sup>, 那么,  $V$ =软体部湿重。根据公式 $V=(\delta_m L)^3$ , 回归获得形状系数 $\delta_m$ 。

### 1.2 阿伦纽斯温度(Arrhenius temperature, $T_A$ )

虾夷扇贝取自大连獐子岛养殖海域, 根据虾

夷扇贝个体大小分为A、B、C、D和E 5组(表1), 暂养温度为 $(10 \pm 1)^\circ\text{C}$ , 海水盐度为29.3, 期间每天定量投喂新月菱形藻(*Nitzschia closterium*), 每2天全量换水1次。驯养1周后开始实验。温度设置5、10、15、20、25 $^\circ\text{C}$  5个梯度。在每个温度条件下, 每个规格的扇贝设5个平行, 3个空白对照。每个塑料桶(4.1L)中放1个扇贝, 实验时间持续2 h。溶解氧(DO)的测定采用(Winkler)碘量法, 根据实验前后溶解氧的浓度变化计算单位干重耗氧率 $[R, \text{mg}/(\text{h} \cdot \text{gDW})]$ 。

$$R \text{ 的计算公式: } R = \frac{DO_0 - DO_t}{W \times t} \times V_0$$

式中,  $DO_0$ 和 $DO_t$ 分别为实验开始和结束时实验水中DO含量(mg/L),  $V_0$ 为实验用水桶的体积(L),  $W$ 为实验贝软组织干质量(g),  $t$ 为实验持续时间(h)。

通过虾夷扇贝的耗氧率 $[\text{mg}/(\text{h} \cdot \text{gDW})]$ 与水温( $T$ , 热力学温度K)倒数的回归, 计算阿伦纽斯温度 $T_A$ <sup>[19]</sup>。 $T_A$ 的计算公式:  $\text{Ln}R = a \times T^{-1} + b$ 。式中, 线性回归关系式的斜率 $a$ 的绝对值为 $T_A$ 。

### 1.3 模型关键参数 $[\dot{p}_M]$ 、 $[E_G]$ 、 $[E_M]$ 的测定

$[\dot{p}_M]$ 、 $[E_G]$ 、 $[E_M]$ 为DEB模型构建必需的参数, 可通过饥饿实验来获得。其中,  $[\dot{p}_M]$ 为单位时间单位体积维持生命所需的能量[volume-specific maintenance costs per unit of time, 单位为 $\text{J}/(\text{cm}^3 \cdot \text{d})$ ];  $[E_G]$ 为形成单位体积结构物质所需的能量(volume-specific costs for growth, 单位为 $\text{J}/\text{cm}^3$ );  $[E_M]$ : 为单位体积最大储存能量(maximum storage density,  $\text{J}/\text{cm}^3$ )。

测定方法: 取同一规格虾夷扇贝300个, 置于过滤海水中, 进行饥饿实验。实验期间, 水温控制在 $10^\circ\text{C}$ , 每周换水2次。每隔1~2周取扇贝5个, 测定其呼吸耗氧率; 另取扇贝15个, 测定总湿重、软体部湿重、软体部干重、软体部有机物含量。其中, 总湿重为阴干0.5 h后的贝全重量, 软体部干重为 $60^\circ\text{C}$ 烘干72 h后的重量。软体部有机物含量根据灰分法估算, 即将称过干重的软体部至于马弗炉中,  $450^\circ\text{C}$ 灼烧4 h后称重; 根据质量差, 获得软体部有机物含量。随着饥饿时间的推移, 直至软体部干重不再降低、呼吸耗氧率保持恒定, 结束实验(约60 d)。

随着饥饿时间的推移, 贝类体内存储的能量逐渐被消耗。当存储的能量被耗尽时, 贝类软体部干重基本恒定, 不随饥饿时间的推移而改

变, 此时的软体部重量即为贝类的结构物质。计算方法如下:

$$[E_G]=W_1 \times C_1 \times k / (T_r \times V)$$

式中,  $W_1$ 为实验结束时保持恒定软体部干重(g);  $C_1$ 为实验结束时贝类软体部有机物含量(%);  $k$ 有机物的能值(8000 J/g)<sup>[18-19]</sup>,  $V$ 为软体部的体积( $\text{cm}^3$ ),  $T_r$ 为生长效率的转换系数( $T_r=40\%$ )<sup>[19]</sup>。

贝类初始能量与饥饿后剩余的结构物质能量之差, 视为贝类体内存储的能量 $[E_M]$ :

$$[E_M]=k \times (W_0 \times C_0 - W_1 \times C_1) / V$$

式中,  $W_0$ 为软体部干重的初始值(g),  $C_0$ 为实验初始时贝类软体部有机物含量(%)。

## 2. 结果

### 2.1 贝壳的形状系数 (Shape coefficient, $\delta_m$ )

根据公式计算, 对软体部湿重的立方根和壳长进行线性回归, 所得的斜率即为形状系数, 据此, 获得虾夷扇贝的 $\delta_m$ 值为0.32(图1)。

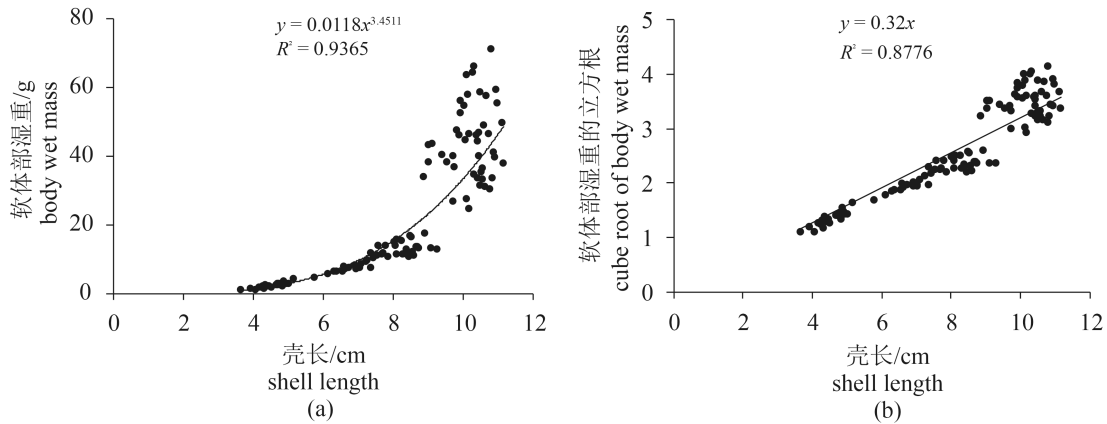


图 1 虾夷扇贝软体部湿重与壳长的关系

(a) 软体部湿重与壳长线性关系; (b) 软体部湿重立方根与壳长的线性关系

Fig. 1 The relation between body wet mass and shell length for scallop *P. yessoensis*

(a) the relation between body wet mass and shell length; (b) the relation between cube root of body wet mass and shell length

### 2.2 阿伦纽斯温度(Arrhenius temperature, $T_A$ )

实验所用虾夷扇贝的平均壳高在4.413~8.507 cm 范围内, 软体部干重的平均值介于0.165~2.880 g 之间(表1)。

在同一实验温度条件下, 虾夷扇贝单位组织干重耗氧率随体重的增加而减小(图2)。水温与耗氧率之间呈现典型的倒钟形, 在5~20 °C范围内, 耗氧率随着水温的升高而增大, 在20 °C达

峰值; 之后, 耗氧率随着水温的升高而降低。

5个规格组(A、B、C、C和E)的虾夷扇贝耗氧率与水温(热力学温度, T)倒数的线性回归关系分别为 $\text{Ln}R = -4293.6T^{-1} + 15.476$  ( $R^2=0.9918$ )、 $\text{Ln}R = -5209T^{-1} + 16.642$  ( $R^2=0.9644$ )、 $\text{Ln}R = -3500T^{-1} + 12.132$  ( $R^2=0.9237$ )、 $\text{Ln}R = -3328T^{-1} + 11.282$  ( $R^2=0.9181$ )、 $\text{Ln}R = -4488T^{-1} + 14.795$  ( $R^2=0.8942$ ) (图3)。设 $T_A$ 为线性回归方程斜率的绝对值, 获

表 1 实验所用虾夷扇贝的基本生物学特性

Tab. 1 Biological characteristics of scallop *P. yessoensis* used in the experiment

特征 features	分组 group				
	规格A size A	规格B size B	规格C size C	规格D size D	规格E size E
壳高/cm shell height	4.413±0.046	5.487±0.074	6.433±0.207	7.497±0.325	8.507±0.266
壳长/cm shell length	4.413±0.193	5.640±0.246	6.373±0.415	7.643±0.358	8.673±0.403
湿重/g wet weight	7.938±1.723	15.0567±2.837	24.920±3.982	40.693±4.611	65.933±5.778
软体部干重/g dry weight	0.165±0.026	0.333±0.067	0.690±0.082	1.310±0.442	2.880±0.514

得模型所需的参数—阿伦纽斯温度 $T_A$ ，平均值为 $(4160\pm 767)$  K。

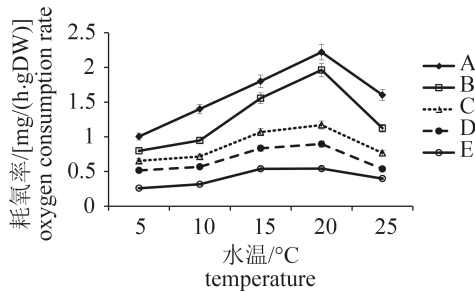


图2 温度对不同规格虾夷扇贝耗氧率的影响

A、B、C、D、E为5种规格的虾夷扇贝，下同

Fig. 2 The effect of temperature on oxygen consumption rate of different sizes of scallop *P. yessoensis*

A, B, C, D, E showed scallop of 5 different sizes, the same below

### 2.3 模型关键参数 $[\dot{p}_M]$ 、 $[E_G]$ 、 $[E_M]$ 的获得

饥饿实验所用的虾夷扇贝基本生物学参数如下：壳高 $(4.24\pm 0.89)$  cm，总湿重 $(6.52\pm 0.64)$  g，软体部湿重 $(3.31\pm 0.26)$  g，软体部干重为 $(0.43\pm 0.09)$  g。饥饿实验持续60 d结束时，虾夷扇贝软体部干重、耗氧率分别降低了56%和81%(图3，图4)。实验开始和结束时，虾夷扇贝软体部有机物含量分别为 $81.4\%\pm 3.2\%$ 和 $53.0\%\pm 2.7\%$ 。

耗氧率基本保持恒定时的耗氧率视为扇贝维持生存所需的最低能量 $[\dot{p}_M]$ 。在 $10^\circ\text{C}$ 条件下，虾夷扇贝的耗氧率稳定在 $0.17\text{ mg}/(\text{ind}\cdot\text{h})$ ，把耗氧转换为能量单位，相当于 $62.96\text{ J}/(\text{ind}\cdot\text{d})$  ( $1\text{ mL O}_2=20.3\text{ J}$  [17])；根据形状系数，转换为单位体积的能量，得 $[\dot{p}_M]$ 平均值 $25.9\text{ J}/(\text{cm}^3\cdot\text{d})$ 。

饥饿持续30 d之后，虾夷扇贝软体部干重保

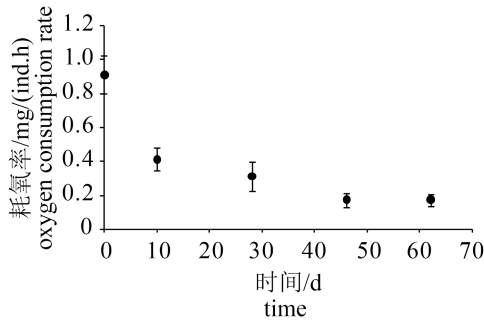


图4 虾夷扇贝耗氧率随饥饿时间的变化情况

Fig. 4 The changes in oxygen consumption rate in the scallop *P. yessoensis* during the starvation experiment

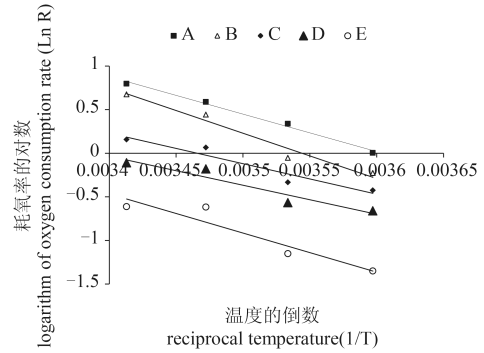


图3 基于不同规格虾夷扇贝耗氧率的阿伦纽斯图(耗氧率与热力学温度倒数的关系)

Fig. 3 Arrhenius plot (ln rate versus 1/T) for the oxygen consumption data of different size scallop *P. yessoensis*

持恒定，基本维持在 $(0.25\pm 0.01)$  g(图5)。根据实验结束时贝类软体部有机物含量 $(53.0\%\pm 2.7\%)$ 、有机物的能值 $^{[18-19]}$ ( $23\text{ KJ/g}$ )以及形状系数，将其转换为能量单位，相当于 $1265\text{ J}/\text{cm}^3$ 。然后除以反应生长效率的转换系数40% [19]，即可获得 $[E_G]$ 值为 $3160\text{ J}/\text{cm}^3$ (表2)。

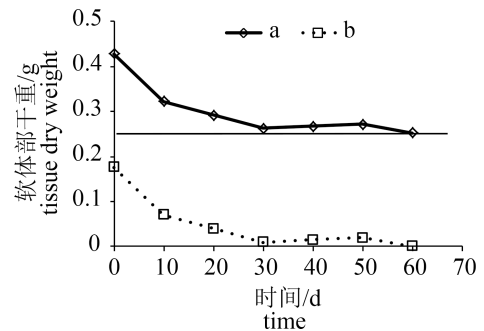


图5 虾夷扇贝软体部干重(a)、存储物质(b)以及结构物质(水平直线)随饥饿时间的变化情况

Fig. 5 The changes in dry flesh weight (a) and storage of reserves (b) in the scallop during the starvation experiment, relative to the structural mass (horizontal solid line)

将贝类初始能量与饥饿后剩余的结构物质能量之差，视为贝类体内存储的能量(平均为 $4.93\text{ KJ}/\text{ind}$ )，根据形状系数将其转化为单位体积最大存储能量，得 $[E_m]$ 值为 $2030\text{ J}/\text{cm}^3$ (表2)。

### 3 讨论

生物的体积是DEB模型最基本的参数之一，

表2  $[E_G]$ 和 $[E_M]$ 的计算结果Tab. 2 Calculated results of  $[E_G]$  and  $[E_M]$ 

	初始值 initial value	结束值 end value	计算结果 calculated value
软体部干重/(g/ind) soft tissue DW	0.39±0.11	0.25±0.03	
软体部有机物含量/% organic content of soft tissue	81.4±3.2	53.0±2.7	
软体部能量/(J/ind) energy content	8.00±1.59	3.07±0.44	
形成单位体积结构物质所需的能量/(J/cm <sup>3</sup> ) volume-specific costs for growth, $[E_G]$			3160±230
单位体积最大储存能量/(J/cm <sup>3</sup> ) maximum storage density, $[E_M]$			2030±120

几乎所有参数都与体积有关。而对于贝类而言, 体积的测定比较困难, 但是测定壳长比较容易。因此, 可根据形状参数来计算体积 $V=(\delta_m L)^3$ 以及体表面积 $S=(\delta_m L)^2$ 。对于贝类, 通常采用壳长与软体部湿重的关系来获得形状系数。已有报道显示, 贝类的形状参数介于0.175~0.381<sup>[19]</sup>。例如, *Crassostrea gigas* 为0.175, *Mya arenaria* 为0.277, *Macoma balthica* 为0.365, *Cerastoderma edule* 为0.381, *Mytilus edulis* 为0.3327<sup>[3]</sup>。本研究获得虾夷扇贝的形状系数为0.32, 在已有研究报道的范围内。

DEB理论假设对于一个特定的物种, 所有生理活动(包括耗氧率、排氨率、摄食率、吸收率等)都在有物种特异性的耐受范围内, 与阿伦纽斯温度(Arrhenius temperature,  $T_A$ )有关<sup>[2]</sup>。在适温范围内, 随着水温的升高, 能量代谢率成幂函数增加; 超出适温范围, 代谢率降低。通常根据贝类在不同温度条件下的耗氧量、排氨率或者生长率等来计算 $T_A$ 。例如, van Haren等<sup>[3]</sup>根据贻贝幼体壳长生长率与食物、水温的关系给出了 $T_A$ 。在已有的研究报道中, 关于温度与贝类耗氧率的研究较多, 可以根据已有的数据来计算。van der Veer等<sup>[19]</sup>根据Wilson等<sup>[20]</sup>的研究结果计算了*Macoma balthica*的 $T_A=(5672\pm 522)$ K, 根据Newell等<sup>[21]</sup>的研究报告, 给出*Cerastoderma edule*的 $T_A=(5290\pm 1107)$ K。本研究给出了低温种虾夷扇贝的 $T_A$ 为(4160±767)K。因为没有关于虾夷扇贝DEB模型参数的研究报道, 所以, 无法与同种类的结果相比较。由于虾夷扇贝属于低温种, 因此其 $T_A$ 值低于已有报道的广温种 $T_A$ 值, 如*Crassostrea gigas*的 $T_A$ 值为5900K。

扇贝维持生存所需的最低能量 $[\dot{p}_M]$ 测定的方法主要有2种, 一种为现场生长间接法, 即在水

温较低条件下, 海域中的贝类经过一段时间的养殖, 软体部质量不但没有增加, 反而因为水温不适宜或者饵料浓度不充足等原因, 摄入的能量不足以维持贝类的消耗, 出现软体部质量下降现象, 根据软体部质量降低的值来推算 $[\dot{p}_M]$ <sup>[22]</sup>。另一种方法就是本研究所采用的室内饥饿法<sup>[23]</sup>。室内饥饿法的优点是可控、易操作。需要注意的是, 饥饿的时间不能过长, 否则软体部中的结构物质会受到损伤而作为能量来源被消耗掉, 使得计算的 $[\dot{p}_M]$ 值偏低。

$[E_M]$ 是最难测定的一个基本参数<sup>[19]</sup>。在饥饿法中, 从计算 $[E_M]$ 值的公式来看(扇贝饥饿初始能值与实验结束时结构物质能值的差), 实验开始时扇贝的肥满度情况将直接影响 $[E_M]$ 的计算结果。Van der Meer等<sup>[24]</sup>认为可以采用投喂的方式, 让生物获得充足的饵料, 使其尽可能地储存能量, 经过饵料充足的供给, 养殖一定时间后, 就可使生物存储最多的能量。然而, 采用室内投饵养殖的方式对于贝类并不合适。从养殖经验来看, 室内养殖贝类, 通常都是越养越瘦。因此, 作者认为, 饥饿实验开始时, 最好是在海域条件适宜、扇贝生长良好的情况下取样, 以免使 $[E_M]$ 的值偏低。

DEB模型已经在国际上广泛应用, 而我国在该方面的研究尚未见报道。本研究给出了虾夷扇贝的5个基本参数的值, 可以为虾夷扇贝DEB模型的构建提供必需的参数。同时, 介绍了有关参数的测定方法, 可以为其他养殖生物个体DEB模型建立提供借鉴。虽然DEB模型的参数与已有的有关贝类生理生态学测定指标有很大的差异, 但是, 有些生理生态学指标是可以利用的, 通过重新计算和分析后, 得到DEB模型所需的参数。从而节省时间和重复实验。

## 参考文献:

- [ 1 ] van der Veer H W, Kooijman S A L M, van der Meer J. Intra- and interspecies comparison of energy flow in North Atlantic flatfish species by means of dynamic energy budgets [J]. *Journal of Sea Research*, 2001, 45(3-4): 303-320.
- [ 2 ] Kooijman S A L M. *Dynamic energy and mass budgets in biological systems* [M]. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [ 3 ] van Haren R J F, Kooijman S A L M. Application of a dynamic energy budget model to *Mytilus edulis* (L.) [J]. *Netherlands Journal of Sea Research*, 1993, 31(2): 119-133.
- [ 4 ] Ren J S, Ross A H. A dynamic energy budget model of the Pacific oyster *Crassostrea gigas* [J]. *Ecological Modelling*, 2001, 142(1-2): 105-120.
- [ 5 ] Ren J S, Ross A H. Environmental influence on mussel growth: a dynamic energy budget model and its application to the greenshell mussel *Perna canaliculus* [J]. *Ecological Modelling*, 2005, 189(3-4): 347-362.
- [ 6 ] Handå A, Alver M, Edvardsen C V. Growth of farmed blue mussels (*Mytilus edulis* L.) in a Norwegian coastal area; comparison of food proxies by DEB modeling [J]. *Journal of Sea Research*, 2011, 66(4): 297-307.
- [ 7 ] Alunno-Bruscia M, van der Veer H W, Kooijman S A L M. The AquaDEB project: physiological flexibility of aquatic animals analysed with a generic dynamic energy budget model (phase II) [J]. *Journal of Sea Research*, 2011, 66(4): 263-269.
- [ 8 ] Larsen P S, Filgueira R, Riisgård H U. Somatic growth of mussels *Mytilus edulis* in field studies compared to predictions using BEG, DEB, and SFG models [J]. *Journal of Sea Research*, 2014, 88: 100-108.
- [ 9 ] Lavaud R, Flye-Sainte-Marie J, Jean F, *et al.* Feeding and energetics of the great scallop, *Pecten maximus*, through a DEB model [J]. *Journal of Sea Research*, 2014, 94: 5-18.
- [ 10 ] Bourlès Y, Alunno-Bruscia M, Pouvreau S, *et al.* Modelling growth and reproduction of the Pacific oyster *Crassostrea gigas*: advances in the oyster-DEB model through application to a coastal pond [J]. *Journal of Sea Research*, 2009, 62(2-3): 62-71.
- [ 11 ] Bernard I, de Kermoisan G, Pouvreau S. Effect of phytoplankton and temperature on the reproduction of the Pacific oyster *Crassostrea gigas*: investigation through DEB theory [J]. *Journal of Sea Research*, 2011, 66(4): 349-360.
- [ 12 ] Marinov D, Galbiati L, Giordani G, *et al.* An integrated modelling approach for the management of clam farming in coastal lagoons [J]. *Aquaculture*, 2007, 269(1-4): 306-320.
- [ 13 ] Sato T, Imazu Y, Sakawa T, *et al.* Modeling of integrated marine ecosystem including the generation-tracing type scallop growth model [J]. *Ecological Modelling*, 2007, 208(2-4): 263-285.
- [ 14 ] Ferreira J G, Hawkins A J S, Monteiro P, *et al.* Integrated assessment of ecosystem-scale carrying capacity in shellfish growing areas [J]. *Aquaculture*, 2008, 275(1-4): 138-151.
- [ 15 ] Spillman C M, Hamilton D P, Hipsey M R, *et al.* A spatially resolved model of seasonal variations in phytoplankton and clam (*Tapes philippinarum*) biomass in Barbamarco Lagoon, Italy [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 79(2): 187-203.
- [ 16 ] 李文姬, 薛真福. 持续发展虾夷扇贝的健康增殖[J]. *水产科学*, 2005, 24(9): 49-51.
- Li W J, Xue Z F. Healthy sustainable proliferation & cultivation of scallop *Patinopecten yessoensis* [J]. *Fisheries Science*, 2005, 24(9): 49-51 (in Chinese).
- [ 17 ] Ren J S, Schiel D R. A dynamic energy budget model: parameterisation and application to the Pacific oyster *Crassostrea gigas* in New Zealand waters [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 2008, 361(1): 42-48.
- [ 18 ] Brey T, Rumohr H, Ankar S. Energy content of macrobenthic invertebrates: general conversion factors from weight to energy [J]. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1988, 117(3): 271-278.
- [ 19 ] van der Veer H, Cardoso J F M F, van der Meer J. The estimation of DEB parameters for various Northeast Atlantic bivalve species [J]. *Journal of Sea Research*, 2006, 56(2): 107-124.
- [ 20 ] Wilson J G, Elkaim B. Tolerances to high temperature of infaunal bivalves and the effect of geographical distribution, position on the shore and season [J]. *Journal of the Marine Biological Association of the United*

- Kingdom, 1991, 71(1): 169-177.
- [21] Newell R I E, Bayne B L. Seasonal changes in the physiology, reproductive condition and carbohydrate content of the cockle *Cardium (=Cerasoderma) edule* (Bivalvia: Cardiidae) [J]. Marine Biology, 1980, 56(1): 11-19.
- [22] Zwarts L. Seasonal variation in body weight of the bivalves *Macoma balthica*, *Scrobicularia plana*, *Mya arenaria* and *Cerastodermis edule* in the Dutch Wadden sea [J]. Netherlands Journal of Sea Research, 1991, 28(3): 231-245.
- [23] Bayne B L, Thompson R J. Some physiological consequences of keeping *Mytilus edulis* in the laboratory [J]. Helgoländer wissenschaftliche Meeresuntersuchungen, 1970, 20(1-4): 526-552.
- [24] van der Meer J, Piersma T. Physiologically inspired regression models for estimating and predicting nutrient stores and their composition in birds [J]. Physiological Zoology, 1994, 67(2): 305-329.

## The estimation of dynamic energy budget (DEB) model parameters for scallop *Patinopecten yessoensis*

ZHANG Jihong<sup>1,2\*</sup>, WU Wenguang<sup>1</sup>, XU Dong<sup>1</sup>, REN Lihua<sup>1</sup>, NIU Yali<sup>1</sup>, ZHAO Xuewei<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;

2. Laboratory for Marine Fisheries and Aquaculture, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266200, China;

3. Zhangzidao Group Co., Ltd, Dalian 116001, China)

**Abstract:** The Dynamic Energy Budget (DEB) theory is a mechanistic theory on metabolism that captures the flows of energy and matter through out the entire life cycle of an organism. A DEB model of an individual organism describes the rates at which the organism assimilates and utilizes energy for maintenance, growth and reproduction, as a function of the state of the organism and of its environment. The DEB model assumes common physiological processes across species and the only difference is in parameter values. It achieves this through a relatively high degree of abstraction, with the pragmatic consequence that the state variables and core parameters are not directly observable. In this paper, both laboratory and field experiments were designed to collect datasets for parameter estimation of scallop *Patinopecten yessoensis*. 5 basic parameters, such as shape coefficient ( $\delta_m$ ), Arrhenius temperature ( $T_A$ ), volume-specific maintenance costs per unit of time ( $[\dot{p}_M]$ ), volume-specific costs for growth ( $E_G$ ) and maximum storage density ( $E_M$ ) were measured and calculated in this paper. And the advantages, disadvantages and precautions of these methods were analyzed. By the method of line regression of shell length and soft tissue wet weight of *Patinopecten yessoensis* to calculate the shape coefficient; With static method to measure the oxygen consumption rate of scallop at different temperature conditions, and then to calculate the Arrhenius temperature; by starvation method to get the parameters of  $[\dot{p}_M]$ ,  $[E_G]$  and  $[E_M]$ . The lab-based starvation experiment was done over 60 days. Changes in body flesh weight were monitored and the oxygen consumption rate was measured. The experiment was finished when the oxygen consumption rate and the dry weight of the soft tissue remained constant. The results showed: (1) The regression relationship between shell length ( $SL$ ) and soft part wet weight ( $WW$ ) is  $WW=0.0118SL^{3.4511}$  ( $R^2=0.9365$ ). According to the formula  $V=(\delta_m L)^3$ , the soft tissue wet weight of the cube root and shell length linear regression, the slope is the shape coefficient. The various estimates by means of weighted regression were highly significant ( $R^2=0.8776$ ,  $p<0.05$ ).  $\delta_m$  value was 0.32, which was in the range of reported results for other species of bivalves. (2)  $T_A$  was calculated on experiments on oxygen consumption as function of temperature. The mean value of  $T_A$  was  $(4160\pm 767)$  K. (3) Soft tissue DW and oxygen consumption rate decreased by 56% and 81% respectively over the starvation experiment. Ash free dry flesh weight was proportional to the dry flesh weight, with coefficients of 81.4% and 53.0% respectively at the beginning and late stages of the experiment.  $[\dot{p}_M]$ ,  $[E_G]$  and  $[E_M]$  were estimated to be  $25.9 \text{ J cm}^{-3} \text{ d}^{-1}$ ,  $3160 \text{ J cm}^{-3}$  and  $2030 \text{ J cm}^{-3}$ , respectively. These results have laid the foundation for the construction of the DEB model of scallop.

**Key words:** *Patinopecten yessoensis*; dynamic energy budget (DEB) model; parameterisation

**Corresponding author:** ZHANG Jihong. E-mail: zhangjh@ysfri.ac.cn

**Funding projects:** National Key Technology R&D Program of China (2011BAD13B06); National Natural Science Foundation of China (41276172; 41076111), Special Scientific Research Funds for Central Non-profit Institutes Yellow Sea Fisheries Research Institutes(2060302201517102-2)