

夏眠对刺参 (*Apostichopus japonicus* (Selenka)) 能量收支的影响

袁秀堂^{1,2}, 杨红生^{1,*}, 王丽丽², 周 毅¹, 张 涛¹, 刘 鹰¹

(1. 中国科学院海洋研究所, 青岛 266071 2. 国家海洋环境监测中心, 大连 116023)

摘要 夏眠是刺参最重要的生理特征, 水温升高是其夏眠的主要诱发因子, 而夏眠的临界温度与刺参体重密切相关。为揭示刺参夏眠对其能量利用对策的影响, 测定了 2 种体重规格 (134.0 ± 13.5 g 和 73.6 ± 2.2 g) 刺参在 10、15、20、25 °C 和 30 °C 5 个温度梯度下的能量收支。结果表明, 温度和体重及其交互作用对刺参能量的摄入均有显著影响, 而温度是影响其摄食能分配的主要因素。研究发现, 刺参在非夏眠期、夏眠临界期和完全夏眠期的能量利用对策有所不同。在非夏眠期, 刺参摄食能支出的最大组分是粪便能, 占摄食能的比例超过 50%, 其次为呼吸耗能, 占 19.8% ~ 39.4%, 而生长能和排泄能占的比例较小, 分别为 5.7% ~ 10.7% 和 2.9% ~ 3.7%。在夏眠临界温度下, 呼吸和排泄耗能占摄食能的比例均显著增大 (分别为 88.3% 和 13.6%), 而生长能所占比例降为负值 (-55.3%)。刺参表现为负生长, 而在夏眠期, 刺参的摄食能和排粪能为零, 为维持其基本生理活动, 不得不动用以往贮存于体内的能量, 消耗于呼吸和排泄等生理过程, 供维持生命之用。总之, 从能量生物学的角度看, 夏眠的主要生态学意义在于刺参长时间处于相对高温环境, 进而导致摄食受阻条件下的一种能量节约方式。

关键词 刺参; 夏眠; 能量收支; 水温; 体重

文章编号: 1000-0933 (2007) 08-3155-07 中图分类号: Q178 Q958 文献标识码: A

Effects of aestivation on energy budget of sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka) (Echinodermata : Holothuroidea)

YUAN Xiu-Tang^{1,2}, YANG Hong-Sheng^{1,*}, WANG Li-Li², ZHOU Yi¹, ZHANG Tao¹, LIU Ying¹

1 Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

2 National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (8) 3155 ~ 3161.

Abstract : Aestivation is defined as a period of dormancy or inactivity allowing animals to survive during an extremely hot and/or dry season. This phenomenon has been observed from various animals including earthworms, snails, bivalves, sea cucumbers, lungfishes and amphibians. *Apostichopus japonicus* is a temperate sea cucumber and known to aestivate when water temperature rises over 20 °C to 24.5 °C. We measured effects of aestivation on energy utilization (i. e., energy distribution in growth, feces, respiration and excretion) of *A. japonicus* with two different body sizes (large (134.0 ± 3.5 g) and small (73.6 ± 2.2 g)) at water temperatures between 10 °C to 30 °C with 5 °C intervals. The data indicated that water temperature, body size and/or their interaction exerted significant effects on energy ingestion. In particular, water

基金项目 国家自然科学基金资助项目 (40576073), 国家科技支撑计划资助项目 (2006BAD09A02); 国家 863 计划资助项目 (2006AA100304, 2006AA10A411)

收稿日期 2006-05-25; 修订日期 2007-03-30

作者简介 袁秀堂 (1972 ~) 男, 山东莒县人, 博士, 主要从事海洋生态学研究. E-mail: xtyuan@nmemc.gov.cn

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hshyang@ms.qdio.ac.cn

Foundation item The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40576073), National S & T Supporting projects (No. 2006BAD09A02) and Hi-tech Research and Development Program of China (No. 2006AA100304, 2006AA10A411)

Received date 2006-05-25; **Accepted date** 2007-03-30

Biography :YUAN Xiu-Tang, Ph. D., mainly engaged in marine ecology. E-mail: xtyuan@nmemc.gov.cn

temperature was the main factor influencing energy allocation of *A. japonicus*. Noticeable variation in the energy utilization of sea cucumber was also observed in this study. During non-aestivation period ,energy deposition in growth was lower and the energy loss through feces accounted for the majority of the ingested energy. Under threshold temperature ,the energy intake became reduced and energy deposited in growth became negative. During aestivation ,sea cucumber discontinued energy intake ,resulting in weight loss. Our study suggested that the ecological implication of aestivation in this species could be a mode of energy saving during long-term hot period.

Key Words : sea cucumber ;*Apostichopus japonicus* (Selenka) ; aestivation ; energy budget ; water temperature ; body size

夏眠 (aestivation)是某些动物为躲避较长时间的炎热或干旱而采取的一种生态适应策略。目前已发现诸多动物具有夏眠的习性 ,如环节动物蚯蚓^[1]、贝类的指甲蛤^[2]和蜗牛^[3,4]、棘皮动物的刺参^[5,6]、鱼类的肺鱼^[7]以及两栖类的青蛙^[8]等。

刺参 *Apostichopus japonicus* (Selenka) ,又称仿刺参 ,属棘皮动物门 (Echinodermata) ,海参纲 (Holothuroidea)^[9] ;主要分布于北纬 35°N 到 44°N 的广大西北太平洋沿岸 ,北起俄罗斯的海参威 ,经日本海、朝鲜半岛南部到我国黄、渤海^[10]。该海参是典型的温带种类 ,有“夏眠”的生态习性 ;当水温升高到一定范围后 ,刺参即迁移到海水较深、较安静的岩石间不食不动 ,进入夏眠。夏眠是刺参最重要的生理特征 ,日本学者最早提出“夏眠”这一概念并对之进行了研究^[11]。之后 ,Choe 报道了刺参夏眠期间消化道结构的变化 ,并认为夏眠临界温度为 24.5℃^[12]。中国学者隋锡林^[11]总结了日本和中国的研究成果 ,认为刺参夏眠的临界温度为 20 ~ 24.5℃ ,差异主要取决于刺参的栖息地和体重的不同。以往的研究多在自然海区通过野外调查的方法进行 ;之后 ,刘永宏等^[5]采用野外调查和室内实验相结合的方法 ,研究了不同体重刺参的夏眠习性 ,并发现体重在 25 ~ 85 g ,86 ~ 160 g 和 超过 160 g 刺参夏眠的临界温度分别为 24.1 ,22.9℃ 和 21.8℃ ,而体重小于 25g 的刺参不夏眠。李馥馨等^[6]研究发现 ,处于夏眠状态的刺参 ,在降温饲养条件下可解除夏眠。以上研究均表明水温升高是刺参夏眠的主要诱发因子 ,刺参夏眠的临界温度与体重密切相关 ,随着刺参体重的增大 ,其夏眠临界温度有所降低。在此基础上 ,Yang 等^[13]在实验室内严格控温条件下 ,通过对不同规格刺参日摄食量的详细记录研究了刺参夏眠的临界温度 ,结果表明体重 72.3 ~ 139.3 g 刺参夏眠临界温度为 24.5 ~ 25.5℃ ,而体重 28.9 ~ 40.7 g 刺参的夏眠临界温度界于 25.5 ~ 30.5℃ 之间 ,这一研究比刘永宏等^[5]报道的结果偏高 ,试验刺参的不同来源可能是夏眠临界温度差异的主要原因。在夏眠对刺参代谢的影响方面 ,Yang 等^[14]的研究表明 ,刺参在夏眠期的代谢率有明显降低的趋势 ,而且不同体重刺参的代谢率对水温的反应有所差异。

尽管国内外学者对动物的夏眠现象有诸多研究 ,但还仅限于其夏眠行为^[3,5,6]、夏眠临界温度^[5,13]和生理代谢特征^[1,2,4,7,14]等方面 ,而对夏眠前后生物能量学的研究 ,目前尚未见报道。本文作为 Yang 等^[13]研究的继续 ,旨在以刺参作为实验材料 ,研究水温对不同体重刺参摄食能及其分配的影响 ,阐述刺参在非夏眠期、夏眠临界期和完全夏眠期的能量利用对策 ,研究结果将有助于进一步理解其夏眠的生态学意义和促进刺参养殖业的可持续发展。

1 材料与方法

1.1 刺参的来源及驯养

刺参于 2004 年 1 月采捕自青岛胶南近海 (采捕时水温为 5℃) ,运回实验室后置于 PVC 水族箱中进行预备性驯养 (至少 30 d)。在驯养和实验期间 ,过量投喂由贝类沉积物和少量海藻粉制成人工饲料 ,其基本成分见表 1。

1.2 实验设计

实验于 2004 年 2 月 14 日 ~ 2004 年 7 月 30 日在中国科学院海洋研究所实验室内进行 ,设 10、15、20、25℃ 和 30℃ 5 个温度梯度 ,并按水温顺序分 5 个阶段 (组)进行。在每组实验开始前 ,水温每日升高 1℃ ,将刺参驯化至实验温度 ,并在实验条件下进行正式驯化 7 d。驯化结束后 ,刺参禁食 48 h ,称量 ,按其湿重将分为以

下两个体重组 (mean ± SE) L (134.0 ± 13.5)g 和 S (73.6 ± 2.2)g (具体分组见表 2)。将刺参按以下方式置于玻璃水族缸 (45 cm × 30 cm × 30 cm, 水体约为 35 L) 中: L 组每缸放 1 头; S 组每缸放 2 头。每组实验持续 28d, 每一处理设 4 个平行。

表 1 实验饲料的基本成分
Table 1 Proximate composition of the experimental diet

水分 Moisture (%)	干物质 Dry matter (%)	粗蛋白 Crude protein (%)	粗脂肪 Fat (%)	灰分 Ash (%)	能值 Energy content (J g ⁻¹)
1.18 ± 0.01	98.82 ± 0.01	3.33 ± 0.15	0.79 ± 0.01	78.42 ± 0.03	2668.8 ± 12.1

表中数值表述为平均值 ± 标准误, 样本量为 3。粗蛋白、粗脂肪、灰分含量和能值基于饲料的干重所得。 Values were expressed as mean ± SE; n = 3。Contents of Protein, Lipid and Ash were shown with their percentage in dry diet and Energy content was showed with data from dry diet

表 2 实验刺参的分组及其基本体重参数
Table 2 Experimental grouping and basic parameters in body sizes of *A. japonicus*

水温 Temperature (°C)	规格 Size	初始湿重 Initial wet weight (g)	终末湿重 Final wet weight (g)	初始干重 Initial dry weight (g)	终末干重 Final dry weight (g)
10	L	112.9 ± 20.8	149.4 ± 25.4	9.2 ± 1.7	11.0 ± 1.9
10	S	81.6 ± 11.4	119.7 ± 14.3	6.7 ± 0.1	9.2 ± 1.1
15	L	138.4 ± 3.0	211.3 ± 7.1	10.4 ± 0.1	15.6 ± 0.4
15	S	73.8 ± 6.5	110.8 ± 4.6	5.4 ± 0.4	8.0 ± 0.4
20	L	138.1 ± 7.1	153.5 ± 12.3	11.3 ± 0.6	12.3 ± 0.6
20	S	69.5 ± 5.1	75.1 ± 5.5	4.6 ± 0.7	5.0 ± 0.6
25	L	131.9 ± 6.3	126.1 ± 6.7	11.4 ± 0.6	9.9 ± 0.5
25	S	81.2 ± 4.2	78.6 ± 8.3	6.4 ± 0.4	5.2 ± 0.5
30	L	138.9 ± 13.7	123.9 ± 8.9	11.6 ± 0.1.1	10.1 ± 0.7
30	S	69.9 ± 7.8	58.7 ± 9.0	5.8 ± 0.6	4.4 ± 0.6

表中数值表述为平均值 ± 标准误, 样本量为 4。 Values were expressed as mean ± SE; n = 4

1.3 实验条件

实验期间, 连续充气, 每天换水 1/2 ~ 2/3。实验海水为沉淀沙滤自然海水, 换水时再经 100 目筛绢过滤; 用水浴法控制水温, 实验期间水温日变幅为 ± 0.5 °C。水族缸内溶氧保持在 5.0 mg · L⁻¹ 以上。其它实验条件为 pH 7.8 ~ 8.2, 盐度 30 ~ 32 ppt, 光照周期为实验期间室内自然光照周期。

1.4 实验过程及样品收集

每组实验在挑选实验用刺参的同时, 再取刺参样品 4 个 (每一规格分别取样 2 个, 其中 L 组每个样品取刺参 1 头, S 组取 2 头), 分析其初始成分。饲料也随机取样 3 个, 作为分析饲料成分的样品。实验期间, 每天过量投饵 1 次 (17:00), 23 h 后用虹吸法吸出残饵, 并对饲料进行溶失实验, 用以校正摄食量。每天于 8:00 和 16:30 两次吸出粪便。实验结束后, 刺参禁食 48 h 以清空其肠道, 称重, 每个水族箱内的海参作为一个样品。残饵、粪便和海参样品于 65 °C 烘干至恒重, 然后干燥保存。

1.5 样品测定

饲料、粪便和海参样品的能值用 PARR1281 卡路里计 (PARR Instrument Company, USA) 测定, N 含量用 240C 型元素分析仪 (Perkin-Elmer Company, USA) 测定。饲料的水分和干物质含量是在 105 °C 条件下烘干 12 h 测得, 粗脂肪含量用索氏抽提法测定, 粗蛋白含量由元素分析仪测定的 N 含量乘以 6.25, 灰份含量用马福炉在 550 °C 下燃烧 12 h 测得。每个样品除 N 含量指标只测定一次外, 其它指标均重复测定 2 次, 并取其平均值作为测值。

1.6 数据计算

刺参的能量收支符合如下关系: $C = G + F + U + R$, 其中 C 为摄食能, G 为生长能, F 为排粪能, U 为

排泄能 R 为代谢能。

根据测定的饲料、粪便和刺参的能值以及摄食量、排粪量以及海参生长的干物质重量,分析计算出摄食能、排粪能和生长能。排泄能以下式计算: $U = (C_N - F_N - G_N) \times 24\ 830$,

其中 C_N 为摄食氮, F_N 为粪便氮, G_N 为生长氮, 24 830 为海参排泄每克氮氮的能值 ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1}$) (以往的研究表明, 棘皮动物的主要氮排泄物为氨氮, 可达 80% ~ 85%^[15], 在本文中假定氨氮是刺参唯一的氮排泄物)。呼吸能由能量收支方程 $R = C - G - F - U$ 求出。

1.7 统计分析

应用 SPSS11.0 软件包对数据进行处理和双因子方差分析, 以 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 分别作为差异显著和极显著的标志。

2 结果

2.1 温度对不同体重刺参生理能量学参数的影响

不同处理下刺参的生理能量学参数见表 3。在本实验设定的温度范围内, 刺参的摄食能与温度的关系呈钟形曲线, 不同温度下摄食能的大小顺序为: $15\text{ }^{\circ}\text{C} > 10\text{ }^{\circ}\text{C} > 20\text{ }^{\circ}\text{C} > 25\text{ }^{\circ}\text{C} > 30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 变化于 $0.0 \sim 2608.5\text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 之间。双因子方差分析表明, 温度、体重及其交互作用均显著影响刺参的摄食能 ($P < 0.01$)。粪便能、排泄能以及呼吸能的变化曲线与摄食能基本相同, 变化范围分别为 $0.0 \sim 1786.1\text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 、 $9.8 \sim 76.9\text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 $54.4 \sim 519.6\text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。双因子方差分析表明, 温度显著影响刺参的粪便能、排泄能和呼吸能 ($P < 0.01$), 体重只对其呼吸能的影响达到显著水平 ($P < 0.01$), 而对粪便能和排泄能的影响并不显著 ($P > 0.05$); 温度和体重的交互作用对粪便能、排泄能及呼吸能的影响也不显著 ($P > 0.05$)。

刺参的生长能与温度的关系亦呈钟形曲线, 变化范围为 $-119.5 \sim 226.0\text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。生长能最大值出现在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的小规格组, 最小值则出现在 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的大规格组。方差分析表明, 温度显著影响刺参的生长能 ($P < 0.01$), 而体重及温度和体重的交互作用对其生长能的影响并未达到显著水平 ($P > 0.05$)。

表 3 不同温度下不同规格刺参能量收支各组分的能量学参数

Table 3 Energy parameters in *A. japonicus* of various sizes at different temperatures

水温 Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	规格 Size	摄食能 C ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	排粪能 F ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	生长能 G ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	排泄能 U ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	呼吸能 R ($\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)
10	L	1477.9 ± 126.5	926.8 ± 116.7	82.0 ± 26.1	50.0 ± 4.5	419.1 ± 31.4
10	S	1464.8 ± 100.6	941.6 ± 89.3	93.7 ± 29.1	56.1 ± 4.6	373.5 ± 20.2
15	L	1912.7 ± 210.4	1279.7 ± 142.6	197.7 ± 12.2	52.4 ± 8.0	382.9 ± 62.9
15	S	2608.5 ± 162.5	1786.1 ± 114.4	226.0 ± 27.0	76.9 ± 6.2	519.6 ± 38.1
20	L	1099.6 ± 210.8	553.7 ± 113.1	74.8 ± 14.4	34.2 ± 7.0	437.0 ± 103.7
20	S	1038.0 ± 184.4	510.4 ± 83.3	77.4 ± 27.8	36.4 ± 5.6	413.9 ± 77.0
25	L	634.8 ± 333.7	327.7 ± 170.5	-22.7 ± 35.6	28.7 ± 9.1	301.0 ± 131.5
25	S	451.7 ± 207.9	225.4 ± 103.3	-27.2 ± 28.4	23.5 ± 4.1	230.1 ± 75.6
30	L	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	-64.2 ± 36.1	9.8 ± 3.4	54.4 ± 32.8
30	S	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	-119.5 ± 27.2	14.3 ± 4.0	105.2 ± 23.4

表中数值表述为平均值 \pm 标准误, 样本量为 4。Values were expressed as mean \pm SE; $n = 4$; C : energy ingested; F : energy lost in feces; G : energy deposited as growth; U : energy lost in excretion; R : energy lost in respiration

2.2 温度和体重对刺参能量收支的影响

表 4 为不同温度下不同规格刺参的能量收支方程。方差分析表明, 温度对刺参能量收支各组分的分配比例影响显著 ($P < 0.01$), 而体重对刺参能量收支各组分分配比例 (粪便能组分除外, $0.01 < P < 0.05$) 的影响未达到显著水平 ($P > 0.05$); 温度与体重的交互作用对各组分占摄食能比例的影响亦未达到显著水平 ($P > 0.05$)。因此, 本文将相同温度下不同体重刺参的能量收支方程合并, 得到各温度下刺参的能量收支方程:

$$10\text{ }^{\circ}\text{C} \quad 100C = 63.6F + 3.7U + 6.1G + 26.6R;$$

15 ℃
20 ℃
25 ℃
30 ℃

$100C = 67.9F + 2.9U + 9.4G + 19.8R ;$
 $100C = 49.9F + 3.3U + 7.4G + 39.4R ;$
 $100C = 53.4F + 13.6U - 55.3G + 88.3R ;$
 $0C = 0F + 8.2U - 100G + 91.8R$ (或 $100G = 8.2U + 91.8R$)。

表 4 不同温度下刺参的能量收支 (mean ± SE)
Table 4 Energy allocation of *A japonicus* at different temperatures (mean ± SE)

水温 Temperature (℃)	规格 Size	摄食能 <i>C</i>	排粪能占摄食能 的百分比 <i>F</i> (% <i>C</i> ⁻¹)	生长能占摄食能 的百分比 <i>G</i> (% <i>C</i> ⁻¹)	排泄能占摄食能 的百分比 <i>U</i> (% <i>C</i> ⁻¹)	呼吸能占摄食能 的百分比 <i>R</i> (% <i>C</i> ⁻¹)
10	L	100	62.5 ± 2.6	5.7 ± 2.3	3.4 ± 0.0	28.4 ± 0.3
10	S	100	63.9 ± 1.9	6.3 ± 2.0	3.9 ± 0.3	25.9 ± 2.2
15	L	100	66.9 ± 0.7	10.7 ± 1.5	2.8 ± 0.3	19.6 ± 1.5
15	S	100	68.4 ± 0.6	8.7 ± 1.0	2.9 ± 0.1	20.0 ± 0.9
20	L	100	50.0 ± 0.6	8.1 ± 2.6	3.1 ± 0.1	38.8 ± 2.1
20	S	100	49.6 ± 1.6	6.8 ± 1.6	3.6 ± 0.2	40.0 ± 2.3
25	L	100	55.8 ± 4.6	-76.2 ± 54.5	17.2 ± 9.4	103.3 ± 41.0
25	S	100	51.0 ± 2.0	-34.4 ± 22.1	10.0 ± 3.6	73.5 ± 17.2
30	L	0	0	-100	4.7 ± 12.2	95.3 ± 12.2
30	S	0	0	-100	11.7 ± 1.4	88.3 ± 1.4

30 ℃ 下,刺参的摄食能和排粪能均为零,其生长能的积累为负值;表中排泄能和呼吸能是以生长能的负百分比来表示的。The energy consumed from food (*C*) and the energy lost in feces (*F*) were zero, and the energy deposited for growth (*G*) was negative at 30 ℃; The percentage of the energy lost in excretion (*U*) and the energy loss for respiration (*R*) were shown in the negative percentage of *G* in this table

从上述分配模式可以看出,刺参能量的最大生长分配比例或最小排泄及呼吸分配比例均出现在 15 ℃ 左右。在 25 ℃ 下,可能是由于受夏眠的影响,刺参生长能的分配比例为负值;而在 30 ℃ 下,刺参已经停止摄食,处于夏眠期,其摄食能和排粪能均为零。

3 分析与讨论

能量收支作为一种手段,可以用来评估生物个体对营养的利用方式以及比较不同生物类群间、同一生物类群在不同生态因子下的能量利用对策^[16]。本研究结果表明,温度是影响刺参能量分配的主要因素,体重对摄食能分配比例的影响达不到显著水平。为了比较刺参在非夏眠期、夏眠临界期和完全夏眠期的能量利用对策,本文将能量收支方程细化为非夏眠期、夏眠临界期及夏眠期进行分析与讨论。

3.1 刺参在非夏眠期的能量收支

从实验结果不难看出,在 10 ~ 20 ℃ 内,刺参的排粪能是刺参能量收支中的最大部分,占摄食能的 49.4% ~ 67.9%。刺参的这一特点是与其摄食机制和食物来源相适应的。海参没有特化的物理磨碎和化学消化器官^[17],兼之在其主要消化部位(中、后肠)较低的消化酶活性^[18],导致海参的消化率较低,而排粪率较高。海参以底质中的有机物,主要包括细菌、原生动物、底栖硅藻、动植物的碎屑等为食物^[12,19,20]。底质中较低的有机质含量使得海参的粪便量增大,这可能也是海参粪便能量损失较高的原因之一。

呼吸耗能占摄食能的比例为 19.8% ~ 39.4%,为收支方程中耗能的第二组分。由于刺参缺乏发达的肌肉且不太运动,因而其耗氧率较鱼类和虾类低^[21,22],这或许是刺参呼吸耗能较低的主要原因。与此相适应,刺参排泄能也较低,仅为摄食能的 2.9% ~ 3.7%。

生长能所占比例是生物能量学中最能反映生物适应环境能力的主要组分。刺参在非夏眠期生长能占摄食能的比例为 6.1% ~ 9.4%。从刺参的整个生长周期(3 ~ 4 a)^[11]来看,刺参生长较为缓慢,除了刺参在高温季节长达 100 d 左右夏眠期的代谢耗能外,刺参生长能占摄食能的比例较低也是其重要原因之一。

3.2 刺参在夏眠临界期及夏眠期的能量收支

Yang 等^[13]通过对刺参日摄食量的详细研究,发现刺参(72.3 ~ 139.3 g)的夏眠临界温度为 24.5 ~ 25.5

℃。这一结果也为进一步研究刺参在夏眠临界温度以及完全夏眠期内的生理能量学提供了良好的基础。本研究结果表明,刺参(72.3 ~ 139.3g)在夏眠临界温度下的能量收支方程为: $100C = 53.4F + 13.6U - 55.3G + 88.3R$ 。从收支方程可以看出,刺参在夏眠临界温度下,其排粪能占摄食能的比例与非夏眠期基本相等,而呼吸和排泄耗能占摄食能的比例均显著增大(分别为88.3%和13.6%)。相应地,刺参生长能占摄食能的比例降为负值,因而刺参在夏眠临界温度下表现为负生长。在30℃下,实验刺参进入夏眠期。在整个实验期间,其摄食量为零,相应地,粪便量也为零。刺参为了维持其基本生理活动,不得不动用以往贮存于体内的能量,供生命维持之用,表现为负生长。因此刺参夏眠期间的能量收支方程可表示为 $100G = 8.2U + 91.8R$,刺参以负生长为代价所付出的能量有8.2%用于排泄耗能,91.8%用于呼吸耗能。刺参在夏眠期间停止摄食,这意味着刺参没有能量摄入,然而刺参为维持其最低代谢要消耗机体自身,体重减轻不可避免,同样的现象前人已有过报道^[5]。本文结果表明,30℃条件下刺参在28 d内体重减轻的比例为5.4% ~ 24.6%。

夏眠动物在高温或干旱季节摄食受阻或因食物缺乏而难以获得食物,因此夏眠动物为了生存,能量的节约势在必行。从目前的研究来看,动物在夏眠期间的能量节约主要是通过生理机能上的降低或休止实现的。Coles 研究认为,淡水蜗牛 *Pila ovata* 在夏眠期间的耗氧率仅为非夏眠期的1/6^[23]。Shinya 和 Buck 对比研究活跃期和夏眠期蚯蚓(*Glossoscolex Paulistus*)的耗氧率,发现夏眠期蚯蚓的耗氧率明显降低^[1]。本文结果表明,大、小规格刺参在夏眠期(30℃)的耗氧率比非夏眠期(以15℃为基准)分别降低了54.4%和79.7%。总之,从能量生物学的角度看,夏眠的主要生态学意义在于,当夏眠动物长时间处于相对高温环境,摄食受阻、难以生存条件下的一种能量节约方式,从而保证了个体的存活和种族的繁衍。

References :

[1] Shinya A , Buck A N. Oxygen uptake of active and aestivating earthworm *Glossoscolex paulistus* (Oligochaeta , Glossoscolecidae). Comparative Biochemistry and Physiology Part A :Physiology ,1985 ,81 (1) 63 –66.

[2] McKee P M , Mackie G L. Respiratory adaptations of the fingernail clams *Sphaerium occidentale* and *Musculium secures* to ephemeral habitats. Can. J. Fish. Aquat. Sci. ,1983 ,40 :783 –791.

[3] Emberton K C. Morphology and aestivation behaviour in some Madagascan acavid land snails. Biological Journal of the Linnean Society ,1994 ,53 (2) :175 –187.

[4] Thomas M A , Agard J B R. Metabolic rate depression in the ampullariid snail *Pomacea urceus* (M ller) during aestivation and anaerobiosis. Comparative Biochemistry and Physiology Part A :Physiology ,1992 ,102 (4) :675 –678.

[5] Liu Y H , Li F X , Song B X , *et al.* Study on aestivation habit of the sea cucumber *Apostichopus japonicus* Selenka I :Ecological characteristics of aestivation. Journal of Fishery Sciences of China ,1996 ,3 (2) :41 –48.

[6] Li F X , Liu Y H , Song B X , *et al.* Study on aestivating habit of sea cucumber *Apostichopus japonicus* Selenka II . The factors relating to aestivation. Journal of Fishery Science of China ,1996 ,3 (2) 49 –57.

[7] Almeida-Val V M F , Mesquita-Saad L S B , Leitão M A B , *et al.* Specialized metabolism and biochemical suppression during aestivation of the extant South American lungfish *Lepidosiren paradoxa*. Comparative Biochemistry and Physiology Part B :Biochemistry and Molecular Biology ,2000 ,126 (Suppl. 1) :2 –8.

[8] Cramp R L , Franklin C E. Arousal and re-feeding rapidly restores digestive tract morphology following aestivation in green-striped burrowing frogs. Comparative Biochemistry and Physiology Part A :Molecular & Integrative Physiology ,2005 ,142 (4) :451 –460.

[9] Liao Y L. Fauna Sinica ,Phylum Echinodermata , Class Holothuroidea. Beijing :Science Press ,1997. 148 –150.

[10] Sloan N A. Echinoderm fisheries of the world :A review. In :Keegan B F , O' Connor B D S eds. Echinodermata , Rotterdam :A. A. Balkema Publishers , the Netherlands ,1984. 109 –124.

[11] Sui X. Culture and enhance of sea cucumber. Beijing :China Agriculture Press ,1988. 54 –55.

[12] Choe S. Study of sea cucumber :morphology , ecology and propagation of sea cucumber. Tokyo :Kaibundou Publishing House ,Japan ,1963 ,133 –138.

[13] Yang H S , Yuan X T , Zhou Y , *et al.* Effects of body size and water temperature on food consumption and growth in the sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka) with special reference to aestivation. Aquaculture Research ,2005 ,36 :1085 –1092.

[14] Yang H S , Zhou Y , Zhang T , *et al.* Metabolic characteristics of sea cucumber *Apostichopus japonicus* (Selenka) during aestivation. J. Exp. Mar.

Boil. Ecol. ,330 (2) :505 — 510.

[15] Propp M V , Ecology of the sea urchins *Strongylocentrotus droebachiensis* of the Barents Sea :metabolism and regulation of abundance. Mar. Biol. Vladivostok ,1977 ,1 :39 — 51.

[16] Lawrence J M , Lane J M ,The utilization of nutrients by postmetamorphic echinoderms. In :Jangoux M ,Lawrence J M eds. Echinoderm Nutrition. Rotterdam :A. A. Balkema Publishers ,the Netherlands ,1982. 368 — 371.

[17] Massin C , Food ,feeding mechanisms :Holothuroidea. In :Jangoux M ,Lawrence J M ,eds. , Echinoderm Nutrition. Rotterdam :A. A. Balkema Publishers ,the Netherlands ,1982. 43 — 53.

[18] Cui L B , Dong Z N , Lu Y H , Histological and histochemical studies on the digestive system of *Apostichopus japonicus*. Chinese J. Zool. ,2000 ,35 1 — 4.

[19] Yingst J Y ,The utilization of organic matter in shallow marine sediments by an epibenthic deposit-feeding holothurian. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. ,1976 ,23 55 — 69.

[20] Moriarty D J W , Feeding of *Holothuria atra* and *sticopus chloronotus* on bacteria , organic carbon and organic nitrogen in sediments of the great barrier reef. Aust. J. Mar. Freshw. Res. ,1982 ,33 255 — 263.

[21] Cui Y B , Bioenergetics of fishes :Theory and Methods. Acta Hydrobiologica Sinica ,1989 ,13 :369 — 383.

[22] Dong S L , Du N S ,Lai W ,Studies on the physio-ecology of *Macrobrachium nipponense* II . Effects of temperature and body weight on energy budget. Oceanologia et Limnologia Sinica ,1994 ,25 (3) :238 — 242.

[23] Coles G C. The termination of aestivation in the large fresh-water snail *Pila ovata* (ampulariidae) I . Changes in oxygen uptake. Comparative Biochemistry and Physiology ,1968 ,25 (2) :517 — 522.

参考文献：

[5] 刘永宏 ,李馥馨 ,宋本祥 ,等. 刺参 (*Apostichopus japonicus* Selenka)夏眠习性研究 I . 夏眠生态特点的研究. 中国水产科学 ,1996 ,3 (2) :41 ~ 48.

[6] 李馥馨 ,刘永宏 ,宋本祥 ,等. 海参 (*Apostichopus japonicus* Selenka)夏眠习性研究 II . 夏眠致因的探讨. 中国水产科学 ,1996 ,3 (2) :49 ~ 57.

[9] 廖玉麟 ,中国动物志 ,棘皮动物门 ,海参纲. 北京 :科学出版社 ,1997. 148 ~ 150.

[11] 隋锡林 ,海参增养殖. 北京. 农业出版社 ,1988. 54 ~ 55.

[18] 崔龙波 ,董志宁 ,陆瑶华 ,仿刺参消化系统的组织学和组织化学. 动物学杂志 2000 ,35 (6) :2 ~ 4.

[21] 崔奕波 ,鱼类生物能量学的理论与方法. 水生生物学报 ,1989 ,13 (4) :369 ~ 383.

[22] 董双林 ,堵南山 ,赖伟 ,日本沼虾生理生态学研究 II . 温度和体重对能量收支的影响. 海洋与湖沼 ,1994 ,25 (3) :238 ~ 242.