

## 青岛近岸海域马粪海胆摄食的实验生态学研究

尤 凯, 曾晓起, 陈大刚, 刘 群, 张秀梅

(中国海洋大学生命科学与技术学部, 青岛 266003)

**摘要:**对采自青岛近岸海域的马粪海胆从其对各种饵料的选择和摄食吸收、温度与自身湿重对其摄食率的影响以及摄食活动特征等方面进行实验生态学研究。结果表明,马粪海胆在多种海藻并存的情况下,对海带及裙带菜等褐藻具明显的选择性,对石花菜及孔石莼等藻类的喜好性较差,但在食物匮乏条件下,马粪海胆的食谱则变得相当广泛。马粪海胆对裙带菜及海带的摄食率均明显高于孔石莼,但其对孔石莼的饵料吸收率则高于海带及裙带菜。马粪海胆的摄食受温度条件及自身湿重的影响,温度偏离适宜范围对摄食有抑制作用,日摄食率与湿重呈显著的指数下降关系,摄食率与湿重、温度因子可建立其较高可靠性的指数回归模型。马粪海胆对食物的口面吸附与对其摄食密切相关,其摄食活动与湿重呈显著的指数下降关系,而与排便活动呈显著的正相关,随湿重增加排便活动虽呈下降趋势,但未达显著水平。自然光照条件下马粪海胆的夜间摄食强度通常高于日间,但在全遮盖的无光照条件下这种昼夜摄食差异则变得不显著;对摄食活动的连续观测表明马粪海胆的摄食活动受光强变化的影响,其摄食活动的高峰出现在光强减弱的早间及傍晚,而日间的强光照环境会抑制其摄食活动。

**关键词:**马粪海胆;海胆;摄食习性;摄食生态;实验生态

### Experimental feeding ecology studies of the edible sea urchin (*Hemicentrotus pulcherrimus*) off the coast of Qingdao, China

YOU Kai, ZENG Xiao-Qi, CHEN Da-Gang, LIU Qun, ZHANG Xiu-Mei (College of Life Science and Technology, Ocean University of China, Qingdao 266003, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 1006~1014.

**Abstract:** The sea urchin, *Hemicentrotus pulcherrimus*, an economically important species in Northern Chinese littoral benthic systems, has been heavily exploited by local fisheries in recent decades. Despite this fact, basic knowledge of the urchin's feeding biology is still scarce. Experimental feeding ecology studies of *H. pulcherrimus* focused on food preference, food consumption and assimilation, feeding activity in this paper. The sea urchins used in the studies were sampled by diving from the shallow subtidal zone of Qingdao beach, north of China. The algae used in the experiments were also collected from the littoral zone. The algae assemblage includes: *Laminaria japonica*, *Undaria pinnatifida*, *Sargassum* sp., *Gelidium amansii*, *Ulva pertusa* and *Grateloupia filicina*.

Results of a food preference experiment showed that *H. pulcherrimus* had an obvious preference for brown algae (*Laminariales*) such as *Laminaria japonica* and *Undaria pinnatifida* over the other seaweeds. In addition, preference indexes for *Und.* and *Lam.* exceeded indices for other seaweeds; in part because their habitats were more similar to that of *H. pulcherrimus* than others. At low food levels *H. pulcherrimus* becomes omnivorous, feeding on any food encountered such as remnants of dead animals or plants. In starving conditions, *H. pulcherrimus* cannibalize one another.

Measured consumption rates and assimilation efficiency of three algae *Laminaria japonica*, *Undaria pinnatifida* and *Ulva pertusa* indicate that the consumption rate of *Ulv.* was the lowest, but had the highest assimilation efficiency. This may be due in part to a longer residential time in sea urchin's intestines.

Food consumption rate of *H. pulcherrimus* varied with the temperature conditions, falling off if the temperature deviated

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(30070593)

**收稿日期:**2003-05-13; **修订日期:**2003-12-10

**作者简介:**尤凯(1969~),男,山东青岛人,博士生,主要从事海洋生物资源生态与管理优化研究。E-mail: Youkai@mail.ouc.edu.cn

**Foundation item:** National Natural Science Foundation of China (No. 30070593)

**Received date:** 2003-05-13; **Accepted date:** 2003-12-10

**Biography:** YOU Kai, Ph. D. candidate, mainly engaged in marine bio-resource ecology and its optimization.

from a temperature optimum. The consumption rate at 14°C was higher than that at 9°C or 19°C. Food consumption rate also changed with the body weight of *H. pulcherrimus*. The Food consumption rate ( $F_c$ ) had a significant negative correlation with body weight ( $W$ ) ( $\alpha < 0.01$ ), the regression equation was  $F_c = 64.89W^{-1.1641}$ . Based on the experimental results, a multiple regression model of food consumption rate relative to body weight and water temperature ( $T$ ) was:  $F_c = 63.10W^{-1.131}(0.995)^V$ , where  $V = (T - 13.8)^2$ . Significance tests of multiple correlation coefficient and partial regression coefficient of the model show that they were significant ( $\alpha < 0.05$ ).

Feeding frequency ( $F_f$ ) of *H. pulcherrimus* had a significant negative correlation with body weight ( $\alpha < 0.01$ ); the regression equation was  $F_f = 158.36W^{-0.8001}$ . The sea urchin adsorbed fragments of sand and algae on its body surface to shade itself. The sea urchin almost adsorbed nothing but food chips on its ventral surface; and the rate of adsorption of fragments on its ventral surface had a close correlation with its feeding. The formula for the relationship between feeding frequency and food adsorption frequency of ventral surface ( $A_d$ ) was  $F_f = 5.0122 A_d^{0.3936}$ . We also found that defecation frequency ( $D_f$ ) of *H. pulcherrimus* decreased with the increasing body weight. Feeding activity ( $A_c$ ) (including food feeding and food adsorption) of *H. pulcherrimus* had a significant correlation with defecation frequency ( $\alpha < 0.05$ ). The regression formula was as follows:  $D_f = 5.4271 A_c^{0.6194}$ .

In natural light conditions the food consumption of *H. pulcherrimus* in the daytime was higher than that of night, but in conditions of constant darkness, food consumption was unaffected by time of day. Feeding activity of *H. pulcherrimus* varied with the light intensity, high light intensity restrained the urchin's feeding activity in the daytime, while in suitable weak light intensity (5~30lx) condition at dawn and dusk, the sea urchin would have a higher feeding activity than those of other time periods.

**Key words:** *Hemicentrotus pulcherrimus*; sea urchin; feeding features; feeding ecology; experimental ecology

文章编号:1000-0933(2004)05-1006-09 中图分类号:Q178,S917.4 文献标识码:A

马粪海胆(*Hemicentrotus pulcherrimus*)属海胆纲(Echinoidea),球海胆科(Strongylocentrotidae),为中国及日本沿海的特有种,在中国主要分布于黄、渤海,向南可到浙江、福建沿岸,是海胆渔业中的重要经济种类。近年来食用海胆作为海珍品出口,导致对其采捕量逐年上升,而马粪海胆的资源在中国已渐趋枯竭,可形成规模性渔获量的产区已较难找到,因而开展该品种的资源增殖研究十分重要。海胆增殖研究的先进国家如日本早在 20 世纪 50~60 年代即对一些经济海胆的生物学研究及增殖实验开展了大量工作,如今,日本的海胆苗种生产及增殖业已具相当规模<sup>[1,2]</sup>。我国的海胆研究起步较晚,与其他海产生物资源的研究相比也较为落后,国内最早的海胆研究起源于 20 世纪 50 年代末的海胆生态学调查<sup>[3]</sup>,其后直至近十几年来国内才陆续见到海胆生物学研究的报道,但总起来看内容多集中在苗种培育方面<sup>[4~6]</sup>,关于经济海胆类的基础生物学研究较为薄弱。目前关于经济类海胆摄食的基础生物学研究仅见少量报道,且主要是关于光棘球海胆(*Strongylocentrotus nudus*) (亦称大连紫海胆)及虾夷马粪海胆(*Strongylocentrotus intermedius*) (该种系 1989 年自日本引进)等种类的研究<sup>[7~9]</sup>,而目前关于马粪海胆的摄食生态学研究,国内基本处于空白状态,许多该方面的研究尚未展开。本研究对采自青岛近岸海域的马粪海胆从其对各种饵料的选择及摄食吸收、温度及湿重对其摄食率的影响以及摄食活动特征等方面进行实验生态学研究,旨在探讨马粪海胆的摄食特点,获得有关摄食的基础资料,为其增殖研究的开发提供基本数据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料

实验材料潜水采自青岛近岸潮下带,选取健壮活泼的个体进行实验室水槽饲养,饲养水温 14.2~15.8°C,盐度为 30.8,pH 值 8.0~8.2,溶氧 5.2~5.8ml/L,饲养期间喂饲海带及裙带菜等饵料,定期换水以保持水质清新。实验中所用海带(*Laminaria japonica*)、裙带菜(*Undaria pinnatifida*)、马尾藻(*Sargassum* sp.)、石花菜(*Gelidium amansii*)、孔石莼(*Ulva pertusa*)、蜈蚣藻(*Grateloupia filicina*)等海藻均采自青岛近岸海域。

### 1.2 摄食选择实验

(1)实验分 A、B 组,A 组实验海胆 60 只,壳径 30~42mm,湿重 11.18~23.26g,平均  $15.27 \pm 3.84$ g;饥饿 24h 后随机分为 5 组,每组 12 只,分别引入等重量且随机放置海带、裙带菜、马尾藻、石花菜、孔石莼等 5 种海藻的水槽中;48h 后测计海胆对各种海藻的摄食选择系数,计算公式为:  $E_i = (r_i - N_i)/(r_i + N_i)$ ;其中  $E_i$  为对第  $i$  种海藻的摄食选择系数, $r_i$  为被摄食的第  $i$  种海藻占总摄食海藻的干重比, $N_i$  为第  $i$  种海藻开始投喂时占总投喂海藻的干重比。B 组实验海胆 50 只,壳径 30~41mm,湿重 11.40~23.52g,平均  $15.81 \pm 3.97$ g;饥饿 24h 后随机分为 5 组,每组 10 只并重复 A 组的实验。

(2)将采集的附生裙带菜、囊藻(*Colpomenia* sp.)及孔石莼的石块放入水槽模拟自然植被,然后引入2只马粪海胆,湿重11.17~12.88g;连续观测海胆对模拟自然植被的侵蚀,当海胆食光所有附生在石块上的藻类后,分别先后间隔数日引入鹰爪虾肉(*Trachypenaeus curvirostris*)、活力极差的大马粪海胆(35.84g)及裙带菜,继续观测其摄食状况。

### 1.3 摄食与吸收实验

实验海胆60只,壳径28~43mm,湿重8.29~25.61g,平均 $15.46 \pm 4.47$ g,分为6组每组10只,将海胆饥饿1d后分别投喂鲜海带、裙带菜及孔石莼,每种海藻投喂2组海胆,每天投喂一次,同时搜集一次残饵,投喂量约为海胆湿重的5%,投喂3d,实验水温14.2~15.0℃。相关的计算公式为:日摄食率(%)=日摄食量(湿重)×100/海胆湿重;饵料吸收率(%)=(摄食量干重-排便量干重)×100/摄食量干重。

### 1.4 摄食与湿重及温度实验

(1)摄食与湿重实验 实验海胆50只,壳径28~45mm,湿重7.52~30.28g,依湿重大小分5组每组10只,各组海胆经饥饿1d后投喂海带,投喂及测定方法同上,水温14.2~15.4℃。

(2)摄食与温度实验 实验海胆48只,壳径31~37mm,湿重11.48~18.01g,平均 $14.22 \pm 1.85$ g,分为个体大小大致相当的6组每组8只。2组升温驯养,2组降温驯养,升降温幅皆为1℃/d,最后2组保持原驯养水温14℃,驯养期间保持投喂。升降组水温分别达到9、19℃后,将6组海胆行饥饿处理,1d后投喂鲜海带,投喂及测定方法同上。

### 1.5 摄食及排便活动实验

实验海胆15只,壳径28~47mm,湿重7.65~35.84g,分放置于15只小水槽中,适应8h后于各水槽中投喂剪为方型的海带,每1h观测1次,观测时若发现方型海带有摄食引起的残缺,则将其更换为新的方型海带,并记为有摄食活动发生,同时记录海胆将海带吸附于口面的次数,连续观测75h,实验水温14.8~15.2℃。

### 1.6 摄食日变化实验

(1)昼夜摄食强度 实验海胆30只,壳径28~47mm,湿重7.65~35.84g,分为个体大小大致相当的6组每组5只。将其中的3组海胆分别置于全遮盖状态下的水槽中,另3组分别置于处于自然光照下的水槽中,适应24h后开始实验,实验中规定6:30~18:30为白天,18:30~翌日6:30为夜间,实验时,于每日6:30及18:30向各实验水槽投喂已知重量的海带,同时取出其中的残饵,实验持续72h,实验水温16.8~17.6℃。

(2)摄食的日周变化 实验海胆15只,壳径28~47mm,湿重7.65~35.84g,分放置于15只小水槽中,适应12h后开始实验,实验开始时于各水槽中投喂方型的海带,其后每隔1h观测一次各水槽中投喂海带是否有摄食残缺及是否被吸附于海胆口面,若发现方型海带有摄食引起的残缺,则将其更换为新的方型海带,同时用照度计测量当时的环境光强,连续观测72h,实验水温17.5~18.2℃。

## 2 结果与分析

### 2.1 摄食选择实验

马粪海胆在A、B两组实验中对海藻的摄食选择系数测定结果见表1,对两组实验中海藻的摄食选择系数进行Duncan多范围差异显著性检验,结果见表2。

表1 马粪海胆对海藻的摄食选择系数

Table 1 Food preference indexes of *H. pulcherrimus* on several algae

实验 A Experiment A						实验 B Experiment B					
组号 Group	海带 Lam.	裙带菜 Und.	马尾藻 Sar.	石花菜 Gel.	孔石莼 Ulv.	组号 Group	海带 Lam.	裙带菜 Und.	马尾藻 Sar.	孔石莼 Ulv.	蜈蚣藻 Gra.
1	0.379	0.239	0.034	-0.577	-0.430	1	0.329	0.295	0.008	-0.452	-0.652
2	0.318	0.303	0.121	-0.372	-0.530	2	0.343	0.259	0.013	-0.441	-0.554
3	0.353	0.164	0.069	-0.351	-0.427	3	0.297	0.283	0.105	-0.392	-0.675
4	0.392	0.219	0.010	-0.494	-0.525	4	0.312	0.249	0.080	-0.514	-0.519
5	0.337	0.326	0.091	-0.446	-0.515	5	0.330	0.267	0.067	-0.486	-0.602

表1及表2表明在数种海藻并存的情况下,马粪海胆对摄食海藻的种类具有明显的选择性。由结果可见,马粪海胆对海带、裙带菜、马尾藻呈正选择性,其中尤为喜食海带及裙带菜,对于马尾藻的正选择程度不大而接近中性;对石花菜、孔石莼及蜈蚣藻呈负选择性,其中对石花菜与孔石莼的负选择性相差不大,而对蜈蚣藻的负选择程度最高。综合以上结果,马粪海胆对各种海藻的摄食选择排序为海带、裙带菜>马尾藻>石花菜、孔石莼>蜈蚣藻;即马粪海胆对海带及裙带菜最为喜好,以后依次为马尾藻、石花菜及孔石莼,对蜈蚣藻则最不喜好。



表 2 海藻摄食选择系数差异显著性的 Duncan 多范围检验结果  
Table 2 The results of Duncan multiple range test of food preference indexes

实验 A Experiment A						实验 B Experiment B					
种类 Sp.	海带 Lam.	裙带菜 Und.	马尾藻 Sar.	石花菜 Gel.	孔石莼 Ulv.	种类 Sp.	海带 Lam.	裙带菜 Und.	马尾藻 Sar.	孔石莼 Ulv.	蜈蚣藻 Gra.
Lam.	—	*	**	**	**	Lam.	—		**	**	**
Und.	*	—	**	**	**	Und.		—	**	**	**
Sar.	**	**	—	**	**	Sar.	**	**	—	**	**
Gel.	**	**	**	—		Ulv.	**	**	**	—	**
Ulv.	**	**	**		—	Gra.	**	**	**	**	—

\* 表示差异显著( $\alpha=0.05$ ), \*\* 表示差异极显著( $\alpha=0.01$ ), 空格表示差异不显著

马粪海胆对模拟自然植被的摄食结果见表 3。其中在前 11d 的实验中海胆先是摄食裙带菜,在摄食裙带菜的过程中,海胆先将裙带菜的茎及叶吃光,最后啃食其根部,且在第 7 天啃食裙带菜的根部的同时也开始摄食少量囊藻,至第 8 天裙带菜完全被吃光,海胆开始大量摄食囊藻,当晚间囊藻被摄食大部分后,海胆又开始摄食少量孔石莼,至第 9d 囊藻被全部吃光时,海胆的摄食完全转向孔石莼,至第 11 天将石块上所有海藻啃光。实验第 13 天当水槽中引入鹰爪虾肉后,饥饿 1d 的海胆很快对其发生摄食行为,至第 14 天海胆吃光投入的鹰爪虾肉,同日向水槽中引入活力较弱的大个体马粪海胆,至第 18 天原先的小个体海胆在饥饿 4d 后开始啃食活力下降的大个体马粪海胆壳侧面上的棘及管足,实验第 19 天当水槽中重新引入裙带菜后,小海胆很快放弃了对体弱大海胆的啃食,转向对裙带菜的摄食。

表 3 马粪海胆对模拟自然植被及其他动物饵料的摄食\*  
Table 3 The feeding of *H. pulcherrimus* on simulated vegetation and other animal foods

食物种类 Food	持续时间 Duration(d)									
	1	7	8	9	11	13	14	18	19	
裙带菜(Und.)	$F_i, F_o$	$F_o$	$E_o$	—	—	—	—	—	—	$F_i, F_o$
囊藻(Col.)	$F_i, F_u$	$F_o$	$F_o$	$E_o$	—	—	—	—	—	—
孔石莼(Ulv.)	$F_i, F_u$	$F_u$	$F_o$	$F_o$	$E_o$	—	—	—	—	—
鹰爪虾(Tra.)	—	—	—	—	—	$F_i, F_o$	$E_o$	—	—	—
海胆( <i>H. pul.</i> )	—	—	—	—	—	—	$F_i$	$F_o$	—	$F_s$

\* 表中  $F_i$  表示该饵料被引入实验(Food introduction),  $F_u$  表示未发现该饵料被明显摄食(Feeding unobviously),  $F_o$  表示明显发现该饵料被海胆摄食(Feeding obviously),  $E_o$  表示该饵料被海胆吃光(Eating out),  $F_s$  表示海胆放弃该饵料,转向摄食其他饵料(Feeding shift)

2.2 对海藻的摄食与吸收

马粪海胆对海带、裙带菜及孔石莼的平均日摄食率及饵料吸收率的测定结果见表 4。由表 4 可见马粪海胆对裙带菜及海带的日摄食率及日摄食量均明显高于孔石莼,与海胆对裙带菜及海带的饵料选择均明显高于孔石莼相一致,同时从日摄食率来看,裙带菜高于海带,但从单只海胆的平均日摄食量干重来看,则海胆对海带的摄食量又略高于其对裙带菜的摄食。从饵料吸收率来看,饵料吸收率的高低与海胆对 3 种海藻的摄食率及饵料选择性的高低并不一致。其中,以具有高摄食率及高选择性的海带的饵料吸收率最低,以具有最低摄食率及最低选择性的孔石莼的饵料吸收率最高,同时就单只海胆的日均粪便排泄量来看,以海带的日排便量最高,孔石莼最低。

表 4 马粪海胆对 3 种海藻的日摄食率与饵料吸收率  
Table 4 Consumption rate and assimilation efficiency of *H. pulcherrimus* on three algae

海藻种类 Seaweed	组别 Group	海胆湿重 Weight of sea urchin(g)	日摄食量干重 Consumption amount(mg)	日排便量干重 Excretion amount(mg)	平均日摄食率 Consumption rate(%)	饵料吸收率 Assimilation efficiency(%)
海带(Lam.)	A	15.36±4.64	617.03	206.14	2.82	66.59
	B	15.50±4.66	664.12	237.64	3.01	64.22
	Mean	15.43±4.53	640.58	221.89	2.92	65.41
裙带菜(Und.)	C	15.54±4.93	595.27	167.03	3.24	71.94
	D	15.46±4.82	635.00	166.11	3.47	73.84
	Mean	15.50±4.74	615.13	166.57	3.36	72.89
孔石莼(Ulv.)	E	15.43±4.46	493.35	133.53	1.42	72.93
	F	15.44±4.32	478.33	123.96	1.37	74.08
	Mean	15.43±4.28	485.84	128.71	1.39	73.51

2.3 温度、湿重对摄食的影响

2.3.1 温度对摄食的影响 马粪海胆 9、14℃及 19℃条件下的个体日摄食量及平均日摄食率测定结果见表 5。由 5 可见，马粪海胆的平均日摄食率随温度的改变而有所变化，其中在相同湿重条件下以 14℃的摄食率为最高，温度升至 19℃及降至 9℃时摄食率都有所减低，其中 9℃的摄食率减至 14℃条件下摄食率的 0.817，19℃的摄食率减至相当于 14℃摄食率的 0.788。

2.3.2 湿重对摄食的影响 马粪海胆平均日摄食率随自身湿重变化的结果见图 1。其中，平均日摄食率( $F_c$ )与海胆湿重( $W$ )间呈极显著的幂指数相关( $P < 0.01$ )，关系式为  $F_c = 64.89W^{-1.1641}$ ，相关系数为  $R^2 = 0.9534 > R_{0.01}^2 = 0.921$ 。

2.3.3 摄食率与湿重、温度 依据马粪海胆的日摄食率随湿重增加呈指数下降以及环境温度偏离适宜温度亦引起摄食率下降的变化趋势建立型如： $F = aW^bC^{\Delta T^2}$  的摄食率对湿重、温度回归模型，其中  $F$  为摄食率， $W$  为海胆的湿重； $\Delta T$  为环境水温  $T$  与最适摄食温度的差值， $a, b, c$  分别为常数。依据马粪海胆在不同湿重及温度条件下对海带的日摄食率结果(表 4、5 及图 1)，同时最适摄食温度取值为 13.8℃，确定模型参数  $a, b, c$  后得摄食率对湿重、温度的关系函数： $F = 63.10W^{-1.131}(0.995)^{\Delta T^2}$ ， $\Delta T = T - 13.8$ ；Matlab 图示结果见图 2。对方程进行复相关系数检验及  $F$  检验得： $R = 0.940 > R_{2,10,0.01} = 0.776$ ； $F = 37.706 > F_{2,10,0.01} = 7.559$ ；以上均表明摄食率  $F$  与海胆湿重  $W$  及环境温度  $T$  呈极显著的相关关系( $P < 0.01$ )；对偏回归系数进行  $t$  检验得： $a$  为  $t = 11.455 > t_{10,0.01} = 3.169$ ， $b$  为  $t = 8.356 > t_{7,0.01} = 3.169$ ， $c$  为  $t = 2.464 > t_{10,0.05} = 2.228$ ，表明各偏回归系数均达到显著性水平( $P < 0.05$ )。

2.4 摄食活动与排便活动

以马粪海胆啃食方型海带的摄食发生次数占总观测次数的百分比作为摄食频率，则摄食频率随海胆湿重的变化结果见图 3。结果表明，随体重的增加其摄食频率相应减小。其中，海胆湿重( $W$ )与摄食频率( $F_f$ )呈极显著的负相关( $P < 0.01$ )，关系式为  $F_f = 158.36W^{-0.8001}$ ，相关系数为  $R^2 = 0.5248 > R_{0.01}^2 = 0.411$ 。

以马粪海胆吸附方型海带于口面的次数占总观测次数的百分比作为饵料的口面吸附频率，则饵料的口面吸附频率随海胆湿重的变化结果见图 4。结果表明，随体重的增加其饵料口面吸附频率相应减小。其中，海胆湿重( $W$ )与饵料口面吸附频率( $A_d$ )呈显著的负相关( $P < 0.01$ )，关系式为  $A_d = 251.63W^{-0.8109}$ ，相关系数为  $R^2 = 0.336 > R_{0.05}^2 = 0.264$ 。

摄食频率( $F_f$ )与饵料口面吸附频率( $A_d$ )的关系见图 5，关系式为  $F_f = 5.0122A_d^{0.3986}$ ，相关系数为  $R^2 = 0.2486$ ，略小于 95% 的相关水平( $R_{0.05}^2 = 0.264$ )，达到 94.1%。可见马粪海胆对饵料的口面吸附与摄食活动有直接关系，应属于其摄食活动的一部分。

将马粪海胆对饵料的口面吸附频率与摄食频率相加来表示海胆的摄食活动频率( $A_c$ )， $A_c$  与湿重的关系见图 6。关系函数为  $A_c = 409.03W^{-0.7958}$ ，相关系数为  $R^2 = 0.5232 > R_{0.01}^2 = 0.411$ 。表明摄食活动与湿重呈极显著的负相关( $P < 0.01$ )。

表 5 不同温度条件下马粪海胆的个体日摄食量与日摄食率

Table 5 Consumption amounts of *H. pulcherrimus* in different temperature conditions

温度(℃) Condition	组别 Group	海胆湿重 (g) Weight of Sea urchin	个体日摄 食量(g) Consumption Amount	平均日摄 食率(%) Consumption Rate	对 14℃的 当量 Compared Equivalent
9	A	14.30±1.94	0.398	2.78	—
	B	14.36±2.01	0.406	2.83	—
	Mean	14.33±1.88	0.402	2.81	0.817
14	C	14.41±2.04	0.506	3.51	—
	D	14.32±2.09	0.483	3.37	—
	Mean	14.37±1.96	0.495	3.44	1.000
19	E	14.33±2.05	0.397	2.77	—
	F	14.26±2.11	0.376	2.64	—
	Mean	14.30±1.97	0.387	2.71	0.788

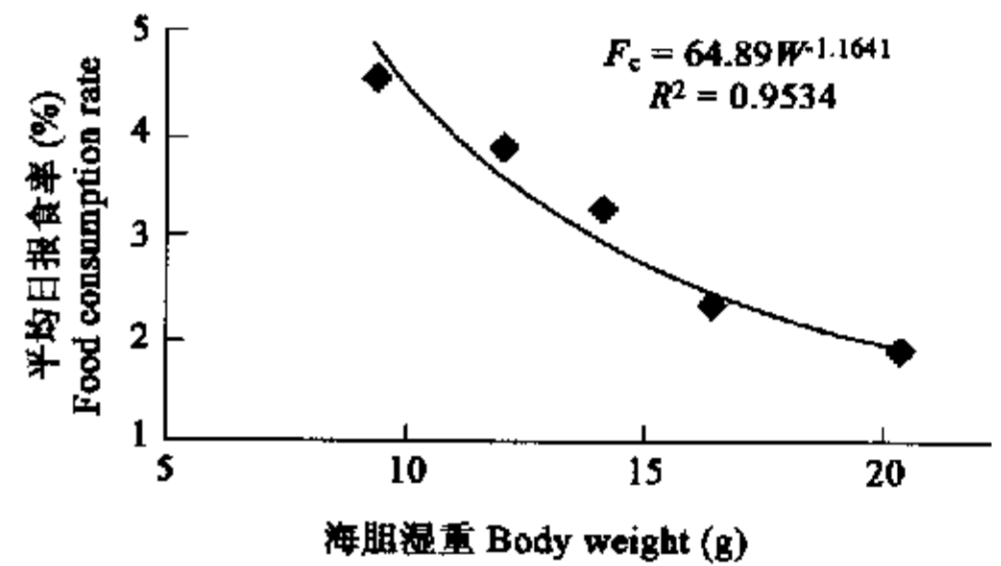


图 1 马粪海胆的湿重与摄食率的关系

Fig. 1 The relationship of food consumption rate and body weight of *H. pulcherrimus*

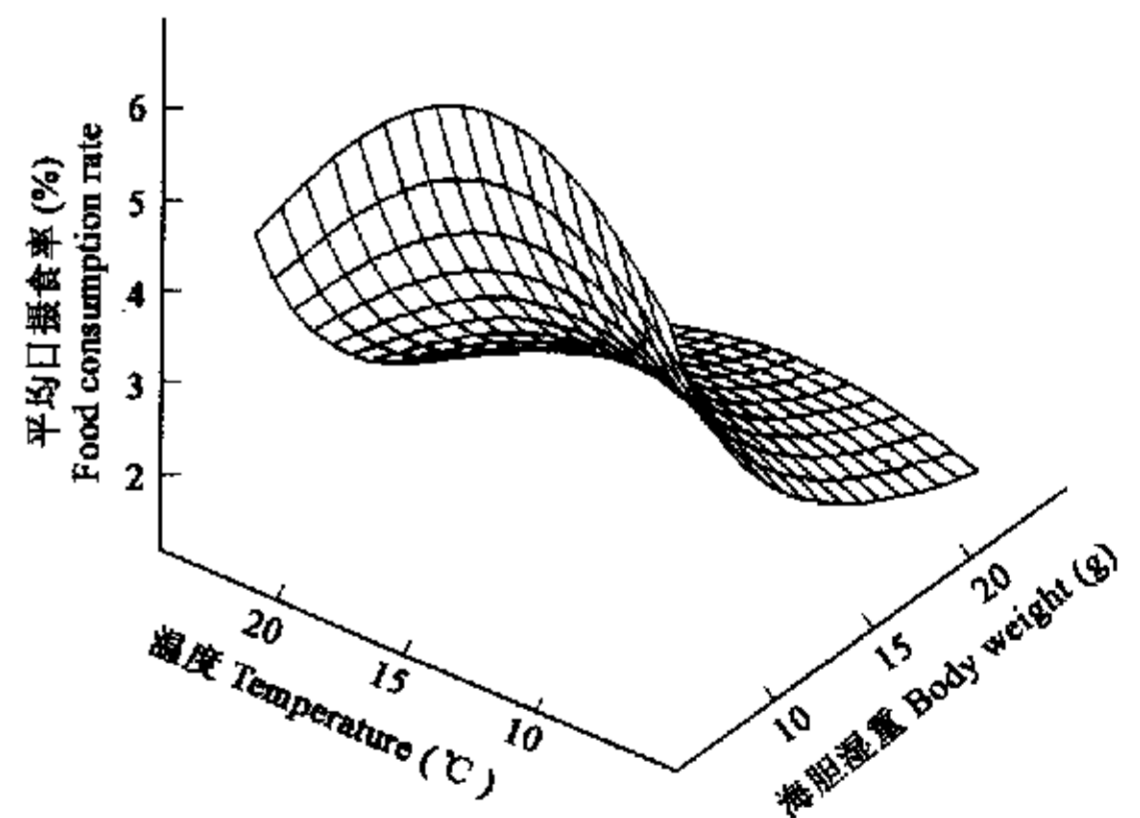


图 2 马粪海胆的摄食率与海胆湿重及环境温度的关系

Fig. 2 Food consumption rate with respect to body weight and temperature of *H. pulcherrimus*

以马粪海胆的排便发生数占总观测次数的百分比作为排便频率,排便频率( $D_f$ )与湿重的关系见图 7;由图可见排便频率随湿重增加而下降,但相关系数检验得  $R^2=0.1576 < R_{13,0.05}^2=0.264$ ,相关水平仅达到 85.7%,可见排便活动虽与湿重有一定的相关,但未达到显著性水平。海胆的排便频率与摄食活动性的关系见图 8,回归方程为  $D_f=5.4271A_c^{0.6194}$ ,相关系数为  $R^2=0.3742 > R_{13,0.05}^2=0.264$ ,表明排便活动与摄食活动间呈显著的相关关系( $P < 0.05$ )。

2.5 摄食活动的日变化

马粪海胆在全遮盖及自然光照条件下的日间与夜间摄食量占日总摄食量的平均百分率见差异图 9。由图 9 可见,处于自然光照下的 1,2,3 组海胆的日间与夜间摄食有明显的差异,均表现为日间摄食强度高于相应的夜间摄食强度,分别对 1,2,3 组海胆的日间与夜间摄食百分率的进行差异显著性检验,均达到差异显著水平( $P < 0.05$ )( $t_1=4.309 > t_{4,0.05}=2.132$ ,  $t_2=3.982 > t_{4,0.05}=2.132$ ,  $t_3=2.503 > t_{4,0.05}=2.132$ )。处于全遮盖条件下的 4,5,6 组海胆的日间与夜间摄食未表现出一致的日间摄食强度高于夜间的差异,分别对 4,5,6 组海胆的日间与夜间摄食百分率的进行差异显著性检验,均未达到差异显著水平( $t_4=1.528 > t_{4,0.05}=2.132$ ,  $t_5=1.349 > t_{4,0.05}=2.132$ ,  $t_6=1.086 > t_{4,0.05}=2.132$ )。

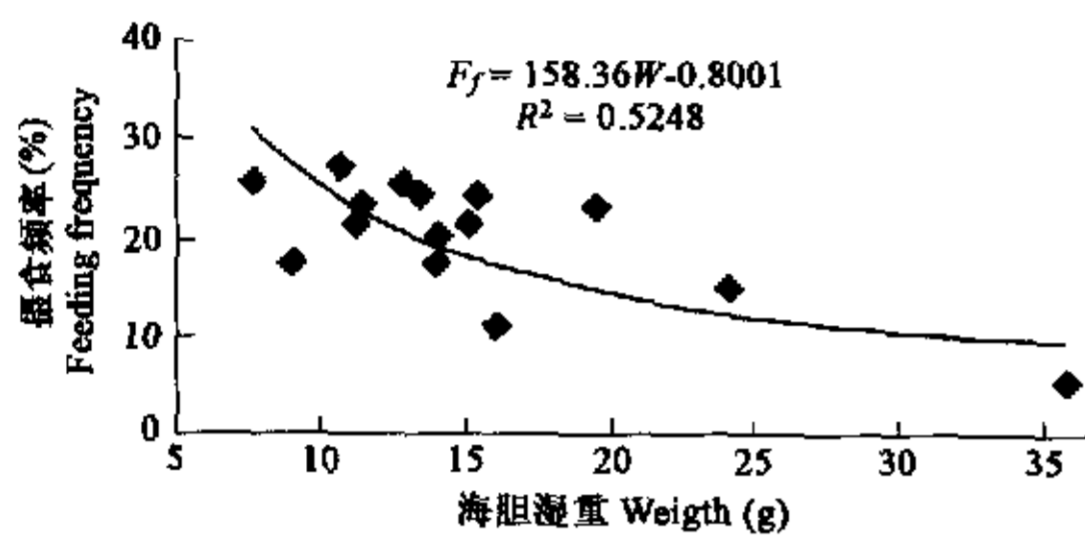


图 3 马粪海胆的摄食频率与湿重

Fig. 3 Feeding frequency and body weight of *H. pulcherrimus*

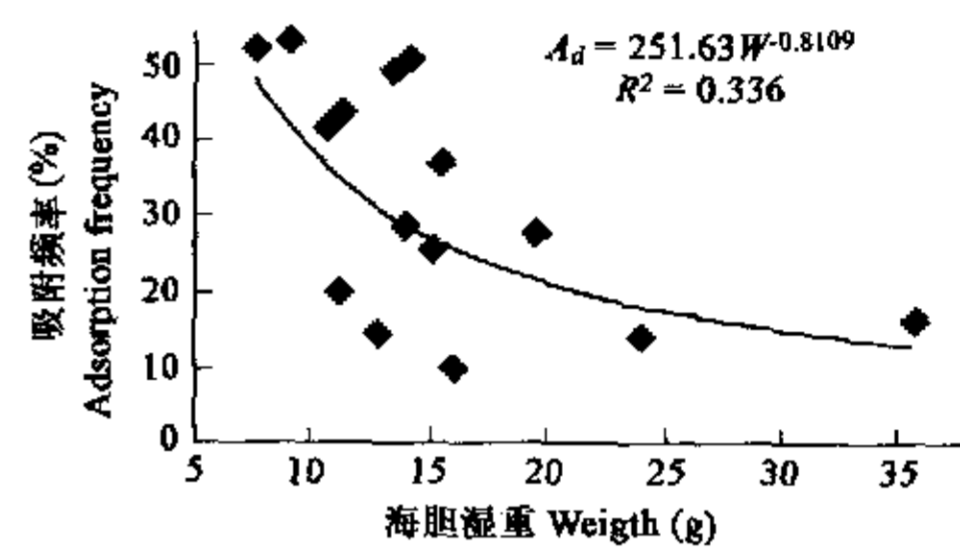


图 4 马粪海胆对饲料的口面吸附频率与湿重

Fig. 4 Food adsorption frequency and body weight of *Hemicentrotus pulcherrimus*

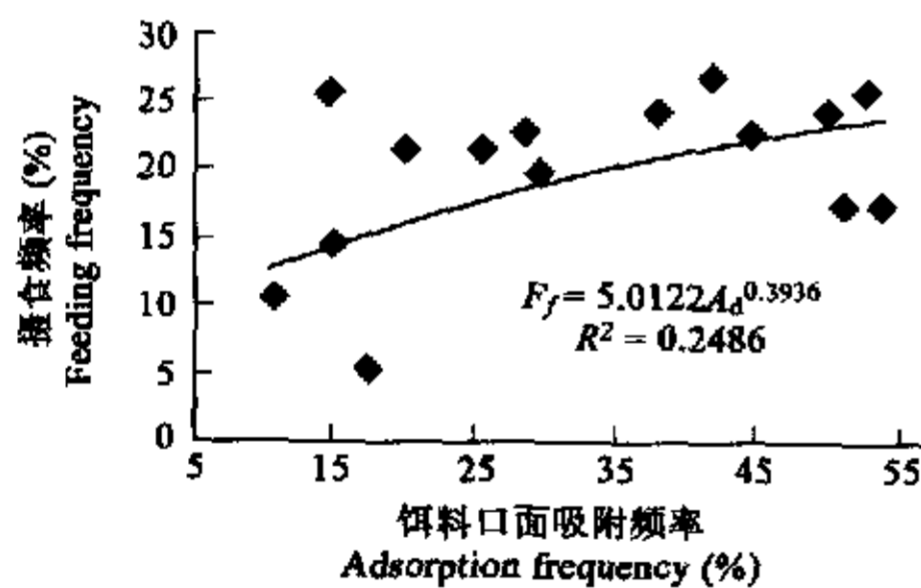


图 5 马粪海胆的摄食与饲料口面吸附频率

Fig. 5 Feeding frequency and food adsorption frequency of *H. pulcherrimus*

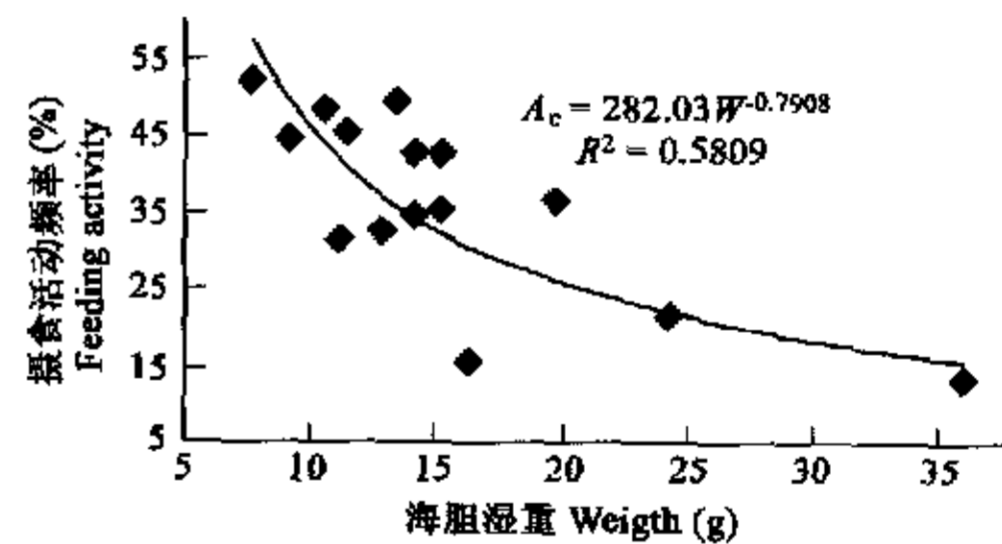


图 6 马粪海胆的摄食活动与湿重

Fig. 6 Feeding activity and body weight of *Hemicentrotus pulcherrimus*

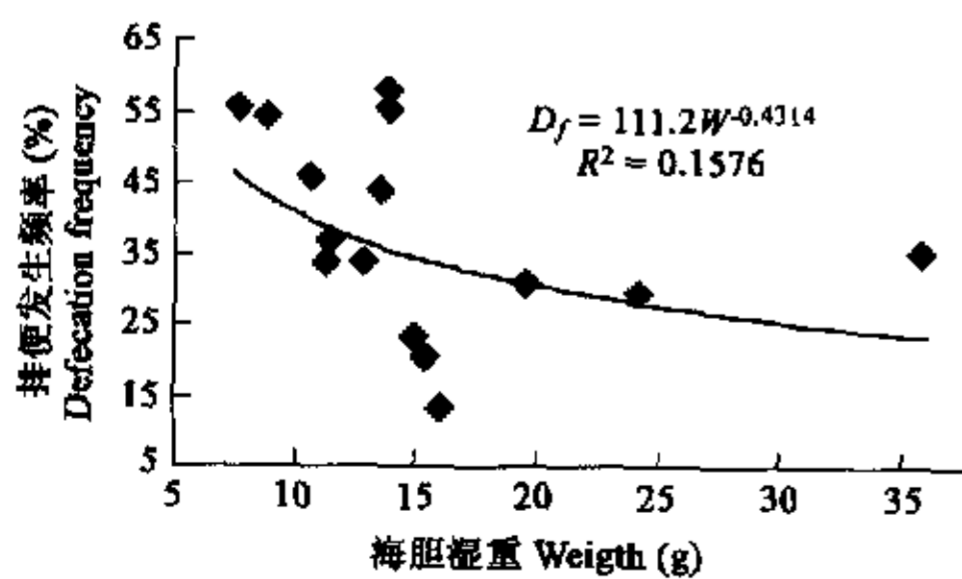


图 7 马粪海胆的排便频率与湿重

Fig. 7 Defecation frequency and body weight of *H. pulcherrimus*

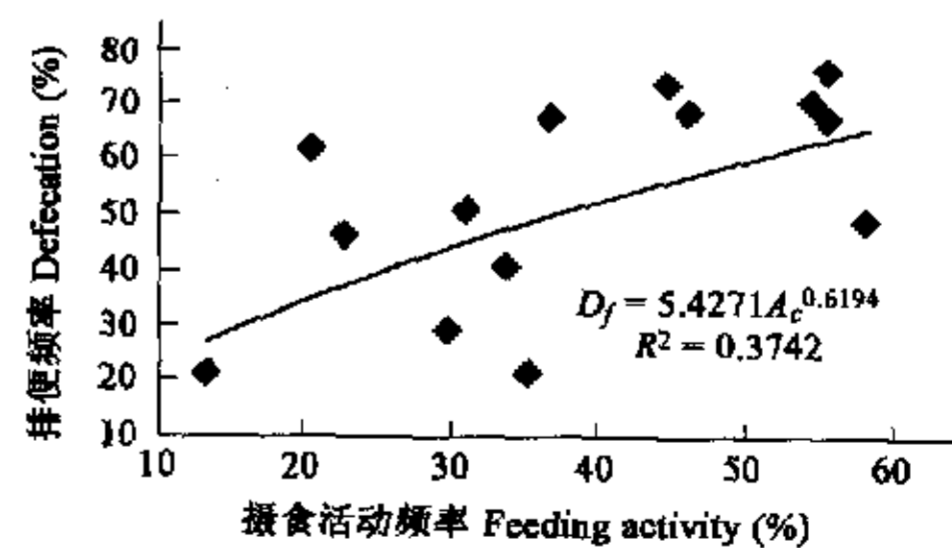


图 8 马粪海胆的排便与摄食活动频率

Fig. 8 Defecation frequency and feeding activity of *H. pulcherrimus*

由于马粪海胆对饵料的口面吸附与摄食活动有直接关系,其对饵料的口面吸附应属于摄食活动的一部分,因此将其对饵料的口面吸附频率与摄食频率相加来表示其摄食活动;马粪海胆的摄食活动频率及环境光强的昼夜连续变化见图 10,由图 10 可见海胆的摄食活动日间弱于夜间,同时海胆的摄食活动在黎明及傍晚时段出现摄食活动高峰,此时的环境光强均为弱光环境(光强 < 30lx),在光强超过 100lx 的日间,海胆的摄食活动明显降低,在光强接近零的夜间,海胆的摄食活动维持相对低的水平,但总起来略高于日间强光照时的摄食活动水平。

3 讨论

3.1 摄食选择及食物种类

本研究表明在数种海藻并存的情况下,马粪海胆对摄食海藻的种类具有明显的选择性,其中对海带、裙带菜最为嗜食,马尾藻次之,而对石花菜、孔石莼等红藻类和绿藻类的喜好性较差。关于正形海胆对海藻的摄食选择曾有研究者根据其研究结果做出过一些解释,如 Leighton 认为海胆喜食某些藻类是由于这些藻类的营养价值较高<sup>[10]</sup>;Lawrence 认为是由于各种海藻的形

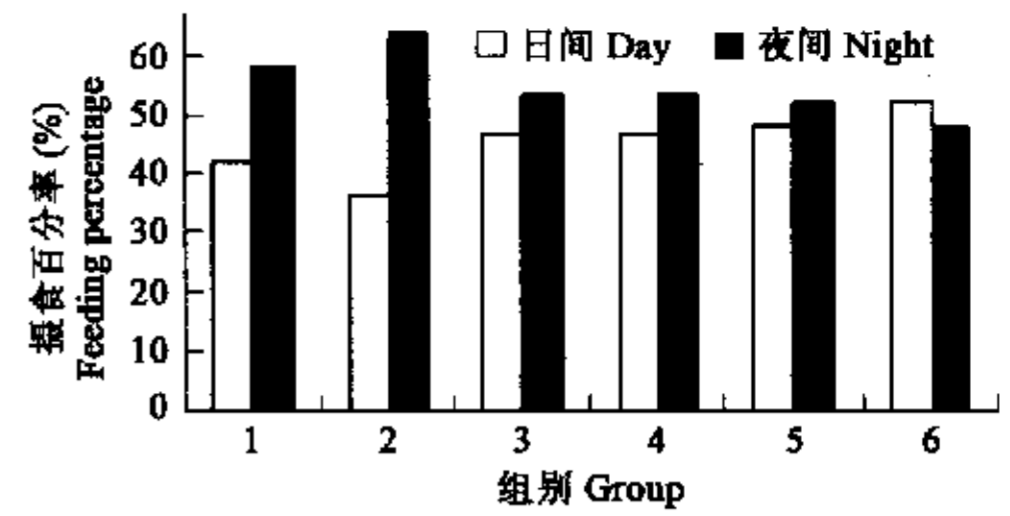


图 9 马粪海胆日间与夜间摄食比率的比较

Fig. 9 Feeding ratios in the day and night of *Hemicentrotus pulcherrimus*

1,2,3 组处于自然光照条件 Natural light, 4,5,6 组处于全黑暗条件 Darkness

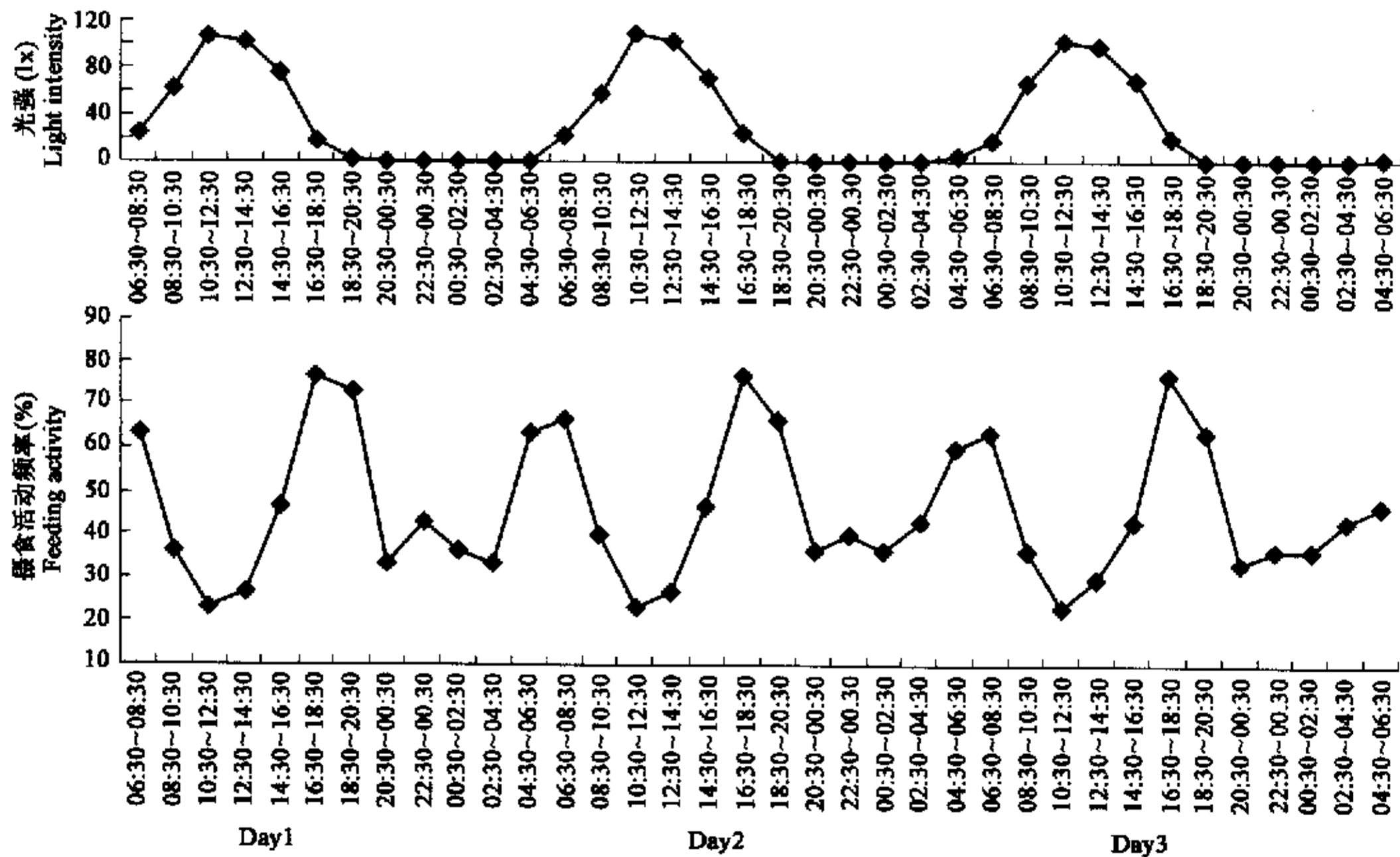


图 10 环境光强及马粪海胆摄食活动频率的昼夜连续变化

Fig. 10 Continuous variations of feeding activity and light intensity of the *H. pulcherrimus*

状所引起的摄食效率不同造成的<sup>[11]</sup>等;但本实验中,海带、裙带菜相对于孔石莼更易被嗜食,而后者的粗蛋白及氨基酸含量分析表明其不亚于海带及裙带菜<sup>[12]</sup>,因而从营养价值的角度不能很好地解释;若从摄食效率的来看,叶片分枝较多的马尾藻相对于膜状的孔石莼更易被摄食亦较难解释。综上,笔者认为从马粪海胆的生态适应性方面解释其对各种藻类的摄食选择较为合理,即自然海域某种海藻的最适生长环境与马粪海胆的最适生栖环境愈相似或愈相近,则该种海藻就愈易被嗜食。这是由于马粪海胆迁移范围小,移动性不强以及咀嚼型口器等特点,使其较难摄食到生长在离其生栖环境较远的藻类,长期食生长于其生栖环境范围内的定生藻类使其对这些藻类表现出摄食偏好。依藻类学研究<sup>[13]</sup>,孔石莼等绿藻类多喜强光,分布水深较浅;石花菜、蜈蚣藻等红藻类多分布水深较深且水流较大的海域。李元山<sup>[14]</sup>及尤凯<sup>[15]</sup>在野外调查中均发现马粪海胆在自然条件下最易栖息于从低潮线至水深 2~3m 左右的岩礁或有石块分布的受水流及风浪影响不大的较平静海域,同时这一区域也是稚海胆附着变态的适宜场所。可见海带、裙带菜等褐藻类的最适生长环境与马粪海胆的最适生栖环境最为相近;依据各种海藻最适生长环境与马粪海胆的最适生栖环境的相似性排序,排在前面的为:海带、裙带、马尾藻;排在后面的为:金膜藻、石花菜、孔石莼及蜈蚣藻,恰与本研究中海胆对各种海藻的摄食选择排序相一致。同时该排序结果一方面可较好地解释松井对分布在日本近岸海域



的马粪海胆的摄食选择报道<sup>[16]</sup>(其对海藻的喜食顺序为裙带菜、海带、马尾藻、金膜藻、凹顶藻、石花菜、孔石莼),另一方面也可解释其它一些正型海胆对某些藻类的选择性,如高绪生报道大连紫海胆对裙带菜及海带最为喜食<sup>[8]</sup>以及常亚青报道虾夷马粪海胆对海藻的选择顺序为海带、裙带菜、马尾藻、角叉菜和石莼等<sup>[9]</sup>。

自然海域中,由于海藻生物的季节性消长,马粪海胆并不是总能获得足够的海藻生物来作为食物,当其生栖环境中当可食的藻类生物缺乏时,海胆的食谱会变得广泛。如松井报道分布在日本海域的马粪海胆有摄食鱼肉及贝肉等的现象<sup>[15]</sup>;廖玉麟报道青岛海域的马粪海胆有食贻贝的现象<sup>[17]</sup>。实际上在室内饲养时发现其会摄食一些鱼肉、虾肉和贝肉,而且对一些虾肉(鹰爪虾)的摄食选择要优于马尾藻、孔石莼和石花菜,但不及海带及裙带菜,同时在野外潜水时亦发现其有食鱼虾尸体及渔民丢弃在海中的食物等现象,本研究通过其对其它动物性饵料的摄食也证明在缺乏藻类食物的情形下,马粪海胆不但会摄食一些动物性饵料如鹰爪虾等,甚至还会在饥饿条件下发生啃食体弱的同类的现象。以上说明,马粪海胆在藻类食物丰富的条件下会对食物有明显的选择性,当饵料变得匮乏时,其对食物的选择性会消失,食谱会变得十分广泛。

### 3.2 对藻类的摄食与吸收

从海胆对海藻的日摄食率来看,裙带菜的日摄食率最高,海带略低于裙带菜,孔石莼则明显地低于前2种海藻;从摄食量的干重来看,则有海带的日摄食量最高,裙带菜略低于海带,孔石莼低于前二者较多。造成这种差异的原因在于海带与裙带菜的含水量不同,实验中测得海带的干湿比约为14.23%,裙带的干湿比约为11.83%,孔石莼约为22.58%,可见海藻的干湿比对于海藻的日摄食率的计算结果会产生一定影响。从摄食海带与裙带菜的干重来看,海胆摄食海带的量要略多于裙带菜,这可能是由于海带的粗蛋白含量低于裙带菜的缘故<sup>[12]</sup>。Fuji亦报道过虾夷马粪海胆对海带的摄食率高于石莼,但对石莼的吸收率高于海带的结果,认为后者吸收率高的原因在于其在海胆消化道的停留时间要长于前者<sup>[18]</sup>,本实验在粪便搜集中发现摄食海带的海胆的粪便排出相对于摄食孔石莼的海胆的粪便排出要快,同时摄食海带的海胆的粪便排出量较孔石莼也明显增多,以上表明一方面可能马粪海胆对海带及孔石莼的消化吸收与虾夷马粪海胆对于海带与石莼的消化吸收有相一致的特点,以及另一方面由于海带中的粗蛋白含量相对较低这两方面的缘故导致马粪海胆产生对海带的摄食率高于孔石莼,同时其对孔石莼的饵料吸收率又高于海带的结果。

### 3.3 温度、湿重对摄食的影响

本研究中温度对摄食率的影响表明青岛近岸采集的马粪海胆在14℃条件下的日摄食率最高,温度上升与下降都抑制了海胆的日摄食率,这与其适宜选择温度(13~15℃)以及其在青岛近岸栖息海域的周年平均水温(13.8℃)极接近<sup>[15]</sup>;同时也与松井关于分布在日本海域的马粪海胆的报道较近似(适宜水温在12~16℃,温度偏离适宜范围都会引起摄食率的下降)<sup>[16]</sup>,这可能是由于两个地区分布的马粪海胆在纬度上较相近的结果。

在摄食强度与体重、温度因子关系的回归建模中, $\Delta T$ 表示环境水温 $T$ 与最适摄食温度的绝对差值。由于摄食率与温度实验中日摄食率虽在14℃条件下最高,但比较9℃及19℃条件下日摄食率的下降程度,最适摄食温度的取值应略低于14℃,因此依据其适宜选择温度以及栖息海域的周年平均水温将建模中最适摄食温度取值为13.8℃。依据该取值建立摄食率与体重、温度的回归模型,经过对复相关系数以及 $F$ 检验,结果表明摄食率 $F$ 与海胆湿重 $W$ 及环境温度 $T$ 达到了显著水平;对偏回归系数进行 $t$ 检验表明各偏回归系数也均达到显著性水平,表明马粪海胆的摄食与体重、温度因子可依据指数模式建立具较高可靠性的回归关系。

综上依据各次对马粪海胆类的日粮测定,其范围大致在1.37%~4.51%,与其它食用海胆相比有:光棘球海胆0.83%~6.5%<sup>[8]</sup>,虾夷马粪海胆0.95~5.81<sup>[18]</sup>;可见以上食用海胆的日粮水平大致相近,这可归因于其身体结构及生活习性相近的缘故。事实上海洋底栖动物的日粮多在5%以下,可见以上食用海胆的日粮水平与海洋底栖动物亦大致相当。

### 3.4 摄食活动及其变化

马粪海胆的摄食率及摄食活动性与其湿重均呈极显著的负相关,表明小海胆的食物需求水平要高于大海胆,同时还表明小海胆与大海胆相比通过增强摄食活动来获得对食物的较高单位体重需求量。对马粪海胆的野外和实验观察均发现其经常通过管足将一些食物碎片、小的杂物甚至是小的沙砾吸附在体表,其中主要是在背面即反口面,该现象可从海胆喜弱光环境<sup>[15]</sup>来说明,即通过体表吸附一些小的物体来进行遮光和隐蔽。但从遮光和隐蔽角度出发,海胆似乎无必要在口面吸附一些小的物体来达到以上目的,然而饵料的口面吸附频率与摄食频率呈显著相关的结果表明马粪海胆对饵料的口面吸附目的很明确,同时我们还发现海胆几乎只在口面吸附一些食物的碎片,而不吸附其他一些与食物无关的碎屑,这也从另一方面说明其对食物的口面吸附不同于遮蔽目的的背面吸附而是与摄食活动是密切相关的。

马粪海胆的排便频率与湿重未达显著相关表明其排便活动除受湿重影响之外,受其它随机因素的影响较大,但总的趋势表明其排便活动随湿重增加而下降,与摄食率随湿重增加而降低相一致,同时其排便活动与摄食活动间仍有显著的相关关系。

马粪海胆在全遮盖的无光照条件下昼夜摄食强度差异消失表明光照条件变化可能是引起其昼夜摄食强度差异主要的因



素,由于马粪海胆喜好弱光环境<sup>[15]</sup>,因而日间较强的光照条件就可能会抑制其摄食活动,进而使得夜间的摄食强度强于日间;另一方面对海胆摄食活动的连续观测表明环境光强的变化确实影响到了海胆的摄食活动性,表现在日间强光照时段出现了摄食活动频率的下降,同时在早间及傍晚当海胆喜好的弱光条件出现时,海胆均达到了摄食活动高峰。

#### References:

- [1] Gao X S. An introduction of sea urchin. In: Gao X S, Chang Y Q. Chinese commercial sea urchin and its enhancement. Beijing: China Agriculture Press, 1999. 1~9.
- [2] Wang Z C, Chang Y Q. Research prospects for marine culture of economic sea urchin. *Chin. J. Marine Science*, 1997, (6): 20~22.
- [3] Zhang F Y, Wu B L, Liao Y L. Chinese sea urchins. *Chin. J. Trans. Biol.*, 1957, (7): 18~24.
- [4] Wei L P, Zhang X L, Wang S F. Studies on the artificial breeding technique of *Hemicentrotus pulcherrimus*. *Chin. J. Marine Science*, 1997, (5): 20~23.
- [5] Liao C Y, Qiu T K. Preliminary study on seed rearing of purple sea urchin *Strongylocentrotus nudus*. *Journal of Fisheries of China*, 1987, 11(4): 277~283.
- [6] Wang Z C, Chang Y Q. Study on the artificial breeding technique of the sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*. *Journal of Fishery Science of China*, 1997, 4(1): 60~67.
- [7] Gao X S, Sun M Y, Hu Q M, et al. Influence of temperature on various development stages of the sea urchin *Strongylocentrotus nudus*. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1993, 24(6): 634~639.
- [8] Gao X S, Sun M Y, Li G Y, et al. Preliminary study on feeding habits of purple sea urchin *Strongylocentrotus nudus*. *Journal of Fisheries of China*, 1990, 14(3): 227~232.
- [9] Chang Y Q, Wang Z C, Wang G J. Effect of temperature and algae on feeding and growth in sea urchin *Strongylocentrotus intermedius*. *Journal of Fisheries of China*, 1999, 23(1): 69~76.
- [10] Leighton, Studies of food preference in omnivorous invertebrates of southern California kelp bed. *Pacific Sci.*, 1966, 20: 104~113.
- [11] Lawrence J M. On relationships between marine plants and sea urchins. *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, 1975, 13: 213~286.
- [12] Zeng C K. Kelp aquaculture. In: *Marine algae aquaculture*. Shanghai: Shanghai Scientific & Technological Press, 1985. 56~112.
- [13] Zeng C K. Commercial marine algae description. In: *Commercial marine algae of China*. Beijing: China Science Press, 1962. 31~131.
- [14] Li Y S, Wang Y L, Li M Z. Studies on the ecology of the sea urchin *Hemicentrotus pulcherrimus*. *Chin. J. Trans. Oceanol Limnol.*, 1995, (2): 37~41.
- [15] You K, Zeng X Q, Liu H, et al. Selectivity and tolerance of sea urchin (*Hemicentrotus pulcherrimus*) to environmental change. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2003, 14(3): 409~412.
- [16] Matsui Kai. Feeding features of sea urchin. In: *Enhancement of sea urchin*. Japanese Fishery Resource protection Association, Tokyo: Ishisaki Co. Ltd., 1966. 15~54.
- [17] Liao Y L. Survey of sea urchin biology. *Chin. J. Fishery Science*, 1982, (3): 1~8.
- [18] Fuji, A. Ecological studies on the growth and food consumption of Japanese common littoral sea urchin, *Strongylocentrotus intermedius*. *Men. Fac. Fish., Hokkaido Uni.*, 1967, 15(2): 83~160.

#### 参考文献:

- [1] 高绪生. 海胆概述. 见: 高绪生, 常亚青. 中国经济海胆及其增养殖. 北京: 中国农业出版社, 1999. 1~9.
- [2] 王子臣, 常亚青. 经济类海胆增养殖研究进展及前景. *海洋科学*, 1997, (6): 20~22.
- [3] 张凤瀛, 吴宝铃, 廖玉麟. 中国的海胆类. *生物学通报*, 1957, (7): 18~24.
- [4] 魏利平, 张树令, 王淑芳. 马粪海胆人工育苗技术研究. *海洋科学*, 1997, (5): 20~23.
- [5] 廖承义, 邱铁凯. 大连紫海胆人工育苗的初步研究. *水产学报*, 1987, 11(4): 277~283.
- [6] 王子臣, 常亚青. 虾夷马粪海胆人工育苗的研究. *中国水产科学*, 1997, 4(1): 60~67.
- [7] 高绪生, 孙勉英, 胡庆明, 等. 温度对光棘球海胆不同发育阶段的影响. *海洋与湖沼*, 1993, 24(6): 634~639.
- [8] 高绪生, 孙勉英, 李国有, 等. 大连紫海胆食性的初步探讨. *水产学报*, 1990, 14(3): 227~232.
- [9] 常亚青, 王子臣, 王国江. 温度和饵料对虾夷马粪海胆摄食及生长的影响. *水产学报*, 1999, 23(1): 69~76.
- [12] 曾呈奎. 海藻养殖. 见: 曾呈奎. 海藻栽培学. 上海: 上海科学技术出版社, 1985. 56~112.
- [13] 曾呈奎. 经济海藻叙述. 曾呈奎, 张德瑞, 张峻甫, 等. 中国经济海藻志. 北京: 科学出版社, 1962. 31~131.
- [14] 李元山, 王远隆, 李美芝. 马粪海胆的生态研究. *海洋湖沼通报*, 1995, (2): 37~41.
- [15] 尤凯, 曾晓起, 刘晖, 等. 马粪海胆对环境变化的耐受性与选择性研究. *应用生态学报*, 2003, 14(3): 409~412.
- [16] 松井 魁. ウニの増殖. 日本水产资源保护协会. 石崎书店, 东京, 1966. 15~54.
- [17] 廖玉麟. 海胆生物学概况. *水产科学*, 1982, (3): 1~8.