

DOI: 10.3724/SP.J.1118.2017.16278

基于碳、氮稳定同位素技术的大亚湾紫海胆食性分析

莫宝霖^{1, 2, 3, 4}, 秦传新^{1, 2, 3}, 陈丕茂^{1, 2, 3}, 黎小国^{1, 2, 3}, 冯雪^{1, 2, 3}, 佟飞^{1, 2, 3},
袁华荣^{1, 2, 3}

1. 中国水产科学研究院 南海水产研究所, 广东 广州 510300;
2. 中国水产科学研究院 海洋牧场技术重点实验室, 广东 广州 510300;
3. 农业部南海渔业资源环境科学观测实验站, 广东 广州 510300;
4. 天津农学院, 天津 300384

摘要: 为掌握大亚湾紫海胆(*Heliocidaris crassispina*)的食性特征, 应用碳、氮稳定同位素技术对 2015 年 8 月所采集紫海胆样本的稳定同位素特征、营养级和食性特征进行了初步研究。结果表明, 大亚湾紫海胆平均 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 -13.35 ± 1.21 ‰, 平均 $\delta^{15}\text{N}$ 值为 9.14 ± 0.38 ‰, 平均营养级为 2.11 ± 0.14 。不同壳径紫海胆之间的碳、氮稳定同位素比值无显著性差异($P > 0.05$)。大亚湾海域紫海胆生活环境周围生物 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围为 -20.76 ‰ ~ -9.93 ‰, $\delta^{15}\text{N}$ 值分布范围为 -0.16 ‰ ~ 14.99 ‰, 营养级范围为 $1.34 \sim 3.77$ 。大亚湾主要生物种类可划分为悬浮物、初级生产者和初级消费者、次级消费者、顶级消费者 4 个营养组群, 其中紫海胆属于次级消费者。8 月份调查海域珊瑚稀少, 大型海藻密度低且死亡降解形成颗粒有机物(Particulate Organic Matter, POM), 陆源 POM 随降雨大量流入大亚湾, 导致紫海胆在 8 月份摄食偏向碎屑食物链, 主要食物来源为 POM, 平均贡献率为 67.3%; 其余摄食种类为沉积物(Sediment Organic Matter, SOM)、裂叶马尾藻(*Scagassum siliquastrum*)、底栖硅藻、浮游动物及浮游植物, 平均贡献率分别为 9.7%、9.3%、6.7%、3.7%及 3.3%。大亚湾紫海胆摄食种类与其栖息地底栖生物存在重叠, 具有一定的食物竞争关系。研究表明, 分析紫海胆食性特征对了解其所在生态系统中营养级水平具有重要意义。

关键词: 紫海胆; 碳稳定同位素; 氮稳定同位素; 食性; 大亚湾

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2017)03-0566-10

紫海胆(*Heliocidaris crassispina*)属于暖水、狭盐性种类, 适宜生长水温为 $15 \sim 30^\circ\text{C}$, 适宜生长盐度为 $25 \sim 30$ ^[1], 通常生活在中国南部沿岸低潮间带和潮下带浅水区域, 具有昼伏夜出的生活习性^[2]。野生紫海胆长期受过度开发利用等因素影响, 资源量严重衰退, 掌握其食性特征进而了解其营养级地位具有重要意义。

近年来, 碳、氮稳定同位素技术被广泛应用于海洋生态系统研究, 通过稳定同位素构建食物网模型为海洋生态学提供了实际操作手段^[3-4]。稳定同位素能够反映生物长期摄食状况, 体现食物

网结构特征和了解生物营养关系^[5-6]。传统胃含物分析法虽然具有直接观测生物摄食状况等优点, 但是相对于稳定同位素技术存在较多缺陷, 如季节性捕食差异, 仅能反映近期摄食情况; 难以辨别胃含物中消化程度大的食物种类^[7-8]等。目前关于紫海胆的研究主要集中在遗传分化^[9]、性腺发育^[10]、标记回捕^[11]和脂质分析^[12]等方面, 在食性研究方面, 仅见胃含物分析, 以及通过调节温度、盐度等物理因子的生态学实验研究和改变摄食种类分析紫海胆摄食习性及饵料变化等^[2, 13-15], 而应用碳、氮稳定同位素对大亚湾紫海胆食性的研

收稿日期: 2016-09-18; **修订日期:** 2016-11-17.

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAD18B02); 海洋公益性行业科研专项经费项目子任务(201405020-2); 深圳市科技计划项目(JSG2014015154342147); 国家自然科学基金项目(41206119).

作者简介: 莫宝霖(1992-), 男, 硕士研究生, 从事渔业资源增殖与养护研究. E-mail: 782364575@qq.com

通信作者: 秦传新, 男, 博士, 副研究员, 从事渔业资源修复与海洋生态研究. E-mail: qincx@scsfri.ac.cn

究鲜有报道。文章运用碳、氮稳定同位素技术测定了大亚湾紫海胆及其潜在食物的稳定同位素值,初步分析了大亚湾紫海胆食性特征,旨在了解紫海胆在大亚湾生态系统中所处地位,为深入了解大亚湾生物群落的食物网结构、能量流动和所处营养级水平提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2015年8月在大亚湾海域进行资源环境调查,共设3个站位(图1),分别为圆洲、辣甲、三门。紫海胆、大型贝类由潜水员潜水采集,紫海胆取大(>50 mm)、中(40~50 mm)、小(<40 mm)3种规格;浮游植物利用浅水III型浮游生物网挂于船尾缓慢拖网获取;浮游动物利用浅水II型浮游动物网挂于船尾缓慢拖网获取;底栖硅藻(Bacillariophyceae)由潜水员在海底放置宽1 m,长5 m干净聚乙烯网(网目为0.5 cm),5~10 d后取出;沉积物(Sediment Organic Matter, SOM)使用圆柱状沉积物收集器悬挂于水中,分为3层,5~10 d后取出;悬浮颗粒有机物(Particulate Organic Matter, POM)使用采水器在距水面0.5 m深处采集,3个站位都采集15 L水样;大型海藻由潜水员在海底采集或者近岸收集、礁石刮取;游泳动物用刺网捕捉。

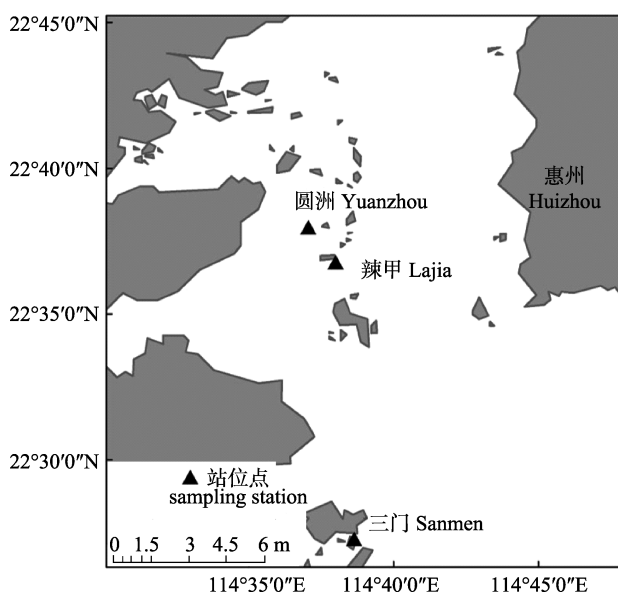


图1 2015年8月份资源环境调查站位示意图

Fig. 1 Sampling stations for resources and environment survey in August 2015

1.2 样品处理

采集生物体长鱼类为吻端至脊椎骨末端长度;虾类为头胸甲长度;蟹类为头胸甲两侧刺之间距离;头足类为胴体背部中线长度,精确到1 mm。紫海胆为两端壳径长度;贝类为壳顶到基部距离,精确到0.1 mm,体重精确到0.1 g。紫海胆取性腺及亚氏提灯附属肌肉;鱼类取背部肌肉;虾类取腹部肌肉;蟹类取螯部肌肉;头足类取胴体部位;贝类取闭壳肌部位;大型海藻进行脱水处理;底栖硅藻网用海水反复冲洗后放置盆中揉洗后沉淀2 min,再用孔径为0.45 μm的GF/F膜(450℃预燃6 h去除无机碳)进行抽滤;浮游动物空腹处理24 h后用80目筛绢过滤,然后用镊子挑出杂质后用锡箔纸包裹;浮游植物、沉积物和POM均用孔径为0.45 μm的GF/F膜(450℃预燃6 h去除无机碳)进行抽滤。所取样品放置于-55℃冷冻干燥机中冷冻干燥48 h,装入1 mL离心管中,用研磨机研磨成细粉末状,再使用1 mol/L盐酸溶液脱碳处理,最后再进行干燥并保存,以备同位素分析。

1.3 稳定同位素分析

样品碳、氮稳定同位素比值采用稳定同位素质谱仪(Isoprime 100)和元素分析仪(PYRO Cube)测定,所获稳定同位素比值用以下公式计算:

$$\delta X = \left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} - 1 \right) \times 10^3$$

式中, X 为 ^{13}C 或 ^{15}N , R 为 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 。碳、氮同位素标准样分别使用拟箭石和大气氮,为保证实验结果准确性和仪器稳定性,每测试10个样品穿插1个标准样品进行检测。 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 分析精度均为2‰。

1.4 数据处理与分析

文章选取浮游动物($\delta^{15}\text{N}$ 值 8.77 ± 0.90)为基线生物,生物种类营养级计算公式:

$$\text{TL} = \frac{\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}}{\Delta\delta^{15}\text{N}}$$

式中,TL表示所计算生物的营养级, $\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}}$ 表示该系统消费者氮同位素比值, $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 表示该系统基线生物氮同位素比值, $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 为营养级富集度,本研究取3.4‰^[16-17]。

用 SPSS Statistics 19.0 单因素方差检验紫海胆不同壳径之间稳定同位素组成差异,运用系统聚类分析生物在标准化欧氏距离(normalized Euclidean distance)上的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与 $\delta^{15}\text{N}$ 值,并划分营养组群。运用所得碳氮同位素比值与其被捕食者稳定同位素相近原则^[15]确定紫海胆摄食对象,进而运用 Iso Source^[18]软件定量分析不同饵料成分贡献比例和食物竞争。

2 结果与分析

2.1 紫海胆稳定同位素比值和营养级

28.00~59.98 mm 壳径范围的大亚湾紫海胆 $\delta^{13}\text{C}$ 均值为 $-(13.35\pm 1.21)\text{‰}$, 范围为 $-10.31\text{‰}\sim 13.78\text{‰}$; $\delta^{15}\text{N}$ 均值为 $(9.14\pm 0.38)\text{‰}$, 范围为 $8.54\text{‰}\sim$

9.71‰; 平均营养级为 2.11 ± 0.14 (表 1)。单因素方差检验显示不同壳径之间碳、氮稳定同位素比值均无显著性差异($P>0.05$)。

2.2 调查海域主要海洋生物稳定同位素和营养级分析

本次调查分析了大亚湾海域紫海胆生活环境周围共计 47 种生物稳定同位素比值,其中鱼类 15 种,蟹类 3 种,虾类 3 种,软体动物 19 种,其他 7 种。表 2 列出了紫海胆潜在摄食生物稳定同位素比值,大亚湾海域生物 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围为 $-20.76\text{‰}\sim -9.9\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 值分布范围为最小值 $-0.16\text{‰}\sim 14.99\text{‰}$ 。大亚湾海域主要生物种类营养级范围为 1.34 (底栖硅藻)~3.77 (长体银鲈, *Gerres macrosoma* Bleeker)。

表 1 大亚湾紫海胆各壳径范围的碳、氮同位素比值
Tab. 1 $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of *Heliocidaris crassispina* with different shell diameters in Daya Bay

壳径组/mm shell diameter range, L	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	壳径/mm shell diameter	体重/g body weight	个数 number	营养级 TL
$L\geq 50$	-13.78 ± 1.53	9.21 ± 0.23	53.03 ± 4.80	53.58 ± 9.09	64	2.13 ± 0.2
$40\leq L< 50$	-13.37 ± 0.22	9.12 ± 0.41	44.63 ± 2.56	38.63 ± 7.18	293	2.1 ± 0.18
$L< 40$	-12.92 ± 0.88	9.08 ± 0.59	36.93 ± 3.12	24.21 ± 6.37	82	2.09 ± 0.09
均值 mean	-13.35 ± 1.21	9.14 ± 0.38	44.87 ± 5.36	38.81 ± 10.89		2.11 ± 0.14

表 2 大亚湾紫海胆潜在摄食生物碳、氮稳定同位素比值
Tab. 2 $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of potential food sources of *Heliocidaris crassispina* in Daya Bay

种类 species	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	平均体长/头长/壳长/mm average length/ head length/shell length	平均体重/g average weight	尾数 number	营养级 TL
裂叶马尾藻 <i>Scagassum siliquastrum</i>	-16.16	7.17	—	—	—	1.53
底栖硅藻 <i>Bacillariophyceae</i>	-17.23	6.54	—	—	—	1.34
浮游植物 <i>Phytoplankton</i>	-20.76 ± 1.42	8.1 ± 1.87	—	—	—	1.80
颗粒有机物 POM	-13.25 ± 2.92	-0.16 ± 1.34	—	—	—	—
沉积物 SOM	-16.04 ± 1.24	9.88 ± 2.21	—	—	—	—
浮游动物 <i>Zooplankton</i>	-20.10 ± 1.40	8.77 ± 0.90	—	—	—	2.00
刺鲷 <i>Psenopsis anomala</i>	-18.57	14.76	127.07	65.35	15	3.76
紫红笛鲷 <i>Lutjanus argentimaculatus</i>	-15.63	14.99	222.00	356.10	1	3.83
长体蛇鲻 <i>Saurida elongata</i>	-17.47	13.17	228.00	63.70	2	3.29
多鳞鳢 <i>Sillago sihama</i>	-14.34	14.58	167.00	44.30	2	3.71
长体银鲈 <i>Gerres macrosoma</i> Bleeker	-14.12	14.80	—	—	—	3.77
黑鲷 <i>Sparus macrocephalus</i>	-17.08	13.26	169.92	155.23	3	3.32
斑鲷 <i>Clupanodon punctatus</i>	-16.42	13.01	13.13	44.87	8	3.24
白姑鱼 <i>Argyrosomus argentatus</i>	-16.29	13.33	160.00	98.80	2	3.34
大鳞鳞鲷 <i>Onigocia macrolepis</i>	-14.16	14.53	129.68	21.79	19	3.69

(待续 to be continued)

(续表 2 Tab. 2 continued)

种类 species	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	平均体长/头长/壳长/mm average length/ head length/shell length	平均体重/g average weight	尾数 number	营养级 TL
大鳞舌鲷 <i>Cynoglossus macrolepidotus</i>	-16.09	13.27	204.29	62.37	7	3.32
黄鳍鲷 <i>Acanthopagrus latus</i>	-17.00	14.44	195.50	216.20	2	3.67
日本金线鱼 <i>Nemipterus virgatus</i>	-16.40	14.53	131.19	72.74	9	3.69
平鲷 <i>Rhabdosargus sarba</i>	-15.60	13.12	140.26	61.99	39	3.28
六指马鲛 <i>Polynemus sextarius</i>	-17.04	13.80	129.00	44.88	13	3.48
艾氏蛇鲻 <i>Ophichthus evermanni</i>	-15.95	13.80	762.00	320.30	1	3.48
日本花棘石鳖 <i>Liolophura japonica</i>	-12.23±1.33	9.66±0.64	31.36	9.39	11	2.26±0.30
锈斑蜆 <i>Charybdis feriatus</i>	-16.48	14.03	60.00	109.60	2	3.55
红星梭子蟹 <i>Portunus sanguinolentus</i>	-16.08	11.40	67.50	137.46	9	2.77
三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i>	-16.70	12.86	42.30	67.20	6	3.20
宽突赤虾 <i>Metapenaeopsis palmensis</i>	-16.20	11.80	29.85	3.78	39	2.89
近缘新对虾 <i>Metapenaeus affinis</i>	-16.04	12.39	58.91	21.32	11	3.06
长叉口虾蛄 <i>Oratosquilla nepa</i>	-20.02	12.97	33.27	24.48	14	3.24
曼氏无针乌贼 <i>Sepiella maindroni</i>	-16.01	14.56	87.50	106.80	2	2.58
镶边海豚螺 <i>Angaria laciniata</i>	-15.74	11.45	48.80	47.85	6	2.79
红底星螺 <i>Astraea haematraga</i>	-14.95	9.89	24.78	7.65	8	2.33
朝鲜花冠小月螺 <i>Lunella coronata granulata</i>	-11.43±0.46	8.55±0.91	20.50	2.85	12	1.94±0.35
节蝶螺 <i>Turbo articulatus</i> Reeve	-12.33	10.11	46.85	26.30	4	2.39
齿纹蜒螺 <i>Nerita yoldirecluz</i>	-8.81±1.16	9.23±0.53	23.00	3.57	10	2.14±0.24
肋蜒螺 <i>Nerita costata</i> Gmelin	-11.66	7.45	28.72	7.33	9	1.61
条蜒螺 <i>Nerita striata</i> Burrow	-13.70	8.91	27.18	6.70	8	2.04
沟鹑螺 <i>Tonna sulcosa</i>	-16.27	12.32	100.60	109.40	1	3.04
阿文绶贝 <i>Mauritia arabica</i>	-12.45±0.12	11.55±0.15	48.27	24.00	23	2.82±0.33
平凡屋顶螺 <i>Tectarius uilis</i>	-15.04±0.47	12.33±0.15	26.70	3.87	63	3.05±0.29
平轴螺 <i>Planaxis sulcatus</i>	-12.33	8.97	21.26	1.99	18	2.06
双带盾桑椹螺 <i>Clypeomorus bifasciatus</i>	-9.93±1.59	9.32±1.76	27.46	2.68	15	2.16±0.15
褶牡蛎 <i>Ostrea plicatula</i> Gmelin	-15.75±0.35	10.84±0.11	37.76	14.35	32	2.61±0.27
企鹅珍珠贝 <i>Pteria penguin</i>	-15.35	10.10	56.70	20.08	6	2.39
短翼珍珠贝 <i>Pteria brevia lata</i>	-16.04	9.62	48.26	18.01	11	1.97
珠母贝 <i>Pinctada margaritifera</i>	-15.30	10.49	55.30	22.40	3	2.50
翡翠贻贝 <i>Perna viridis</i>	-15.36±0.20	9.76±0.18	62.29	21.39	57	2.29±0.05
青蚶 <i>Barbatia virescens</i>	-16.78±1.60	10.74±0.27	27.80	3.11	20	2.58±0.165

2.3 基于稳定同位素的聚类分析

基于稳定同位素的聚类分析结果显示, 在 10 的欧式距离上将大亚湾紫海胆周围食物网主要种类分为 4 个营养组群: 第 1 组群为碎屑 POM; 第 2 组群为初级生产者和初级消费者, 包括浮游植物、底栖硅藻、裂叶马尾藻(*Scagassum siliquastrum*)、浮游动物; 第 3 组群为次级消费者, 主要为齿纹蜒螺(*Nerita yoldi*)、双带盾桑椹螺(*Cly-*

pemorus bifasciatus)、节蝶螺(*Turbo articulatus*)、平轴螺(*Planaxis sulcatus*)等大部分螺类和紫海胆; 第 4 组群为顶级消费者, 主要为多鳞鳢(*Sillago sihama*)、黑鲷(*Sparus macrocephalus*)、长体银鲈(*Gerres macrosoma* Bleeker)、长体蛇鲻(*Saurida elongata*)等鱼类和锈斑蜆(*Charybdis feriatus*)、宽突赤虾(*Metapenaeopsis palmensis*)、长叉口虾蛄(*Oratosquilla nepa*)等其余底栖无脊椎生物(图 2)。

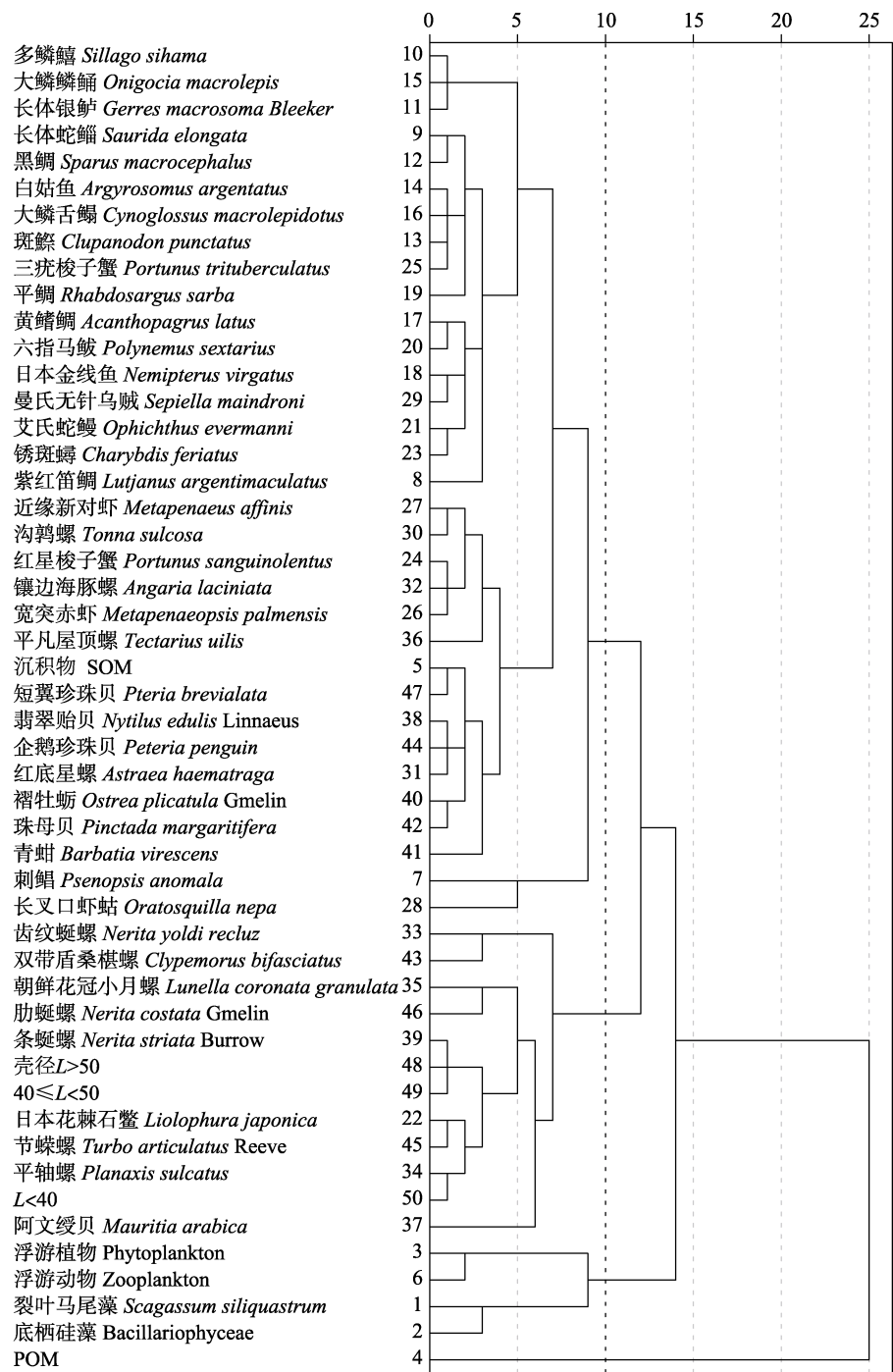


图 2 大亚湾食物网主要生物碳氮稳定同位素比值的聚类分析

Fig. 2 Cluster analyses based on Normalized Euclidean distances of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ for species in the food web of Daya Bay

2.4 紫海胆食物组成分析

根据捕食者碳氮同位素与紫海胆胃含物判断紫海胆主要摄食种类为浮游植物、浮游动物、底栖硅藻、POM、SOM、裂叶马尾藻。采用 Iso Source 软件计算其贡献比例，结果表明 8 月份紫海胆主要摄食种类为 POM，平均贡献率为 67.3%；

其余食物贡献率从大到小依次为 SOM、裂叶马尾藻、底栖硅藻、浮游动物、浮游植物，平均贡献率分别为 9.7%、9.3%、6.7%、3.7%、3.3% (图 3)。

挑选出表 2 中与紫海胆营养级接近的生物进行食物组成分析，结果表明条蜃螺(*Nerita striata*

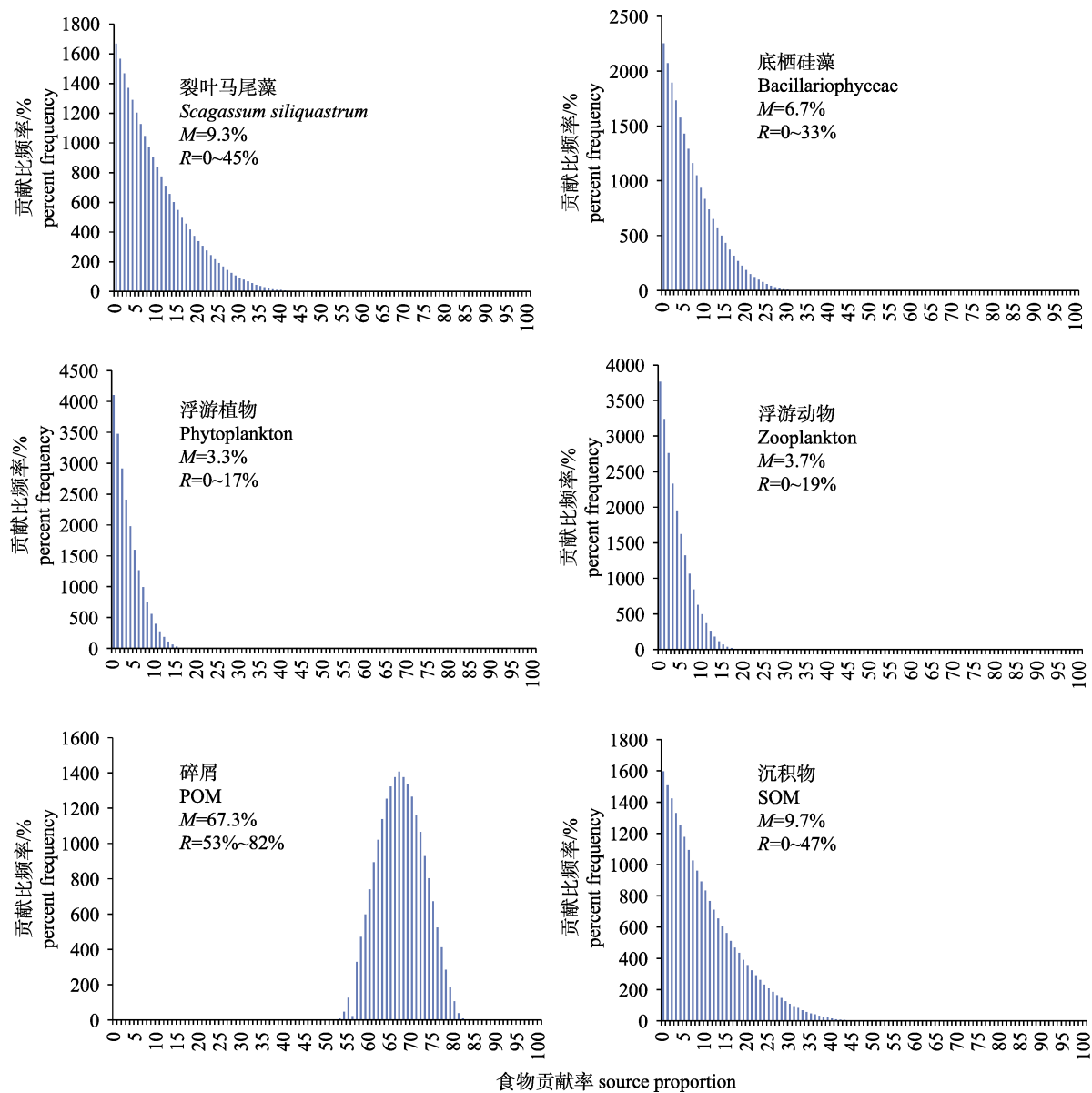


图 3 不同类别生物对紫海胆食物贡献比例频率图
M: 平均值, R: 变化范围.

Fig. 3 The percent frequency of feasible contributions to *Heliocidaris crassispina* food from different species of organism forages
M: mean, R: range.

Burrow)、红底星螺(*Astraea haematraga*)、翡翠贻贝(*Perna viridis*)、短翼珍珠贝(*Pteria brevia*lata)、企鹅珍珠贝(*Peteria penguin*)与紫海胆具有一定的食物竞争关系(表 3)。

3 讨论

3.1 紫海胆食性分析

海胆摄食与其体内消化酶含量有关, Trenzado 等^[19]通过对西班牙卡拉翁 3 种海胆体内消化酶研

究表明, 颗粒球正海胆(*Sphaerechinus granularis*)和拟球海胆(*Paracentrotus lividus*)体内淀粉酶和纤维素酶含量较高, 优先摄食对象偏向于植物饵料, 黑海胆(*Arbacia lixula*)总消化能力(脂肪酶, 蛋白酶和胰蛋白酶活性)较强, 这表明其摄食更为多元化, 可能会摄食动物以提供更多能量。紫海胆摄食种类多元化, 主要根据季节变化和地域差异而发生改变。研究表明大亚湾邻近海域紫海胆啃食多种藻类, 包括半叶马尾藻(*Sargassum*

表 3 基于 Iso Source 混合模型计算潜在食物贡献率
Tab. 3 Results of the Iso Source model for food contribution rate

种类 species	食物贡献率/% source proportion					
	裂叶马尾藻 <i>Scagassum sili-quastrum</i>	底栖硅藻 <i>Bacillario-phyceae</i>	浮游植物 Phytoplankton	浮游动物 Zooplankton	碎屑 POM	沉积物 SOM
紫海胆 <i>Heliocidaris crassispina</i>	9.3	6.7	3.3	3.7	67.3	9.7
条蛭螺 <i>Nerita striata</i> Burrow	3.3	2.3	1.0	1.2	88.5	3.6
红底星螺 <i>Astraea haematraga</i>	12.0	8.6	4.4	4.8	57.6	12.5
翡翠贻贝 <i>Perna viridis</i>	14.8	10.7	5.4	6.0	47.5	15.5
短翼珍珠贝 <i>Pteria brevia lata</i>	19.5	14.1	7.3	8.0	30.8	20.4
企鹅珍珠贝 <i>Peteria penguin</i>	14.8	10.7	5.4	6.0	47.8	15.4

hemiphyllum)、囊藻(*Colpomenia sinuosa*)和石莼(*Ulva lactuca*)等,而在夏季可摄食种类因大型海藻生物量减少而大大减少^[2]。Kim 等^[15]在韩国统营沿岸海域对野生紫海胆进行胃含物分析,结果显示胃含物主要有 2 种绿藻,1 种褐藻,11 种红藻和 2 种无脊椎动物。Yatsuya 等^[20]研究发现,虽然不同海域紫海胆生殖周期基本相同,但是马尾藻属(*Sargassum*)能更好地促进其性腺发育和个体生长,因此紫海胆更偏爱摄食马尾藻属,在马尾藻属草场海域紫海胆密度大于珊瑚礁海域。本研究表明大亚湾紫海胆摄食种类丰富,为杂食性底栖生物,这与其他海域研究基本一致,但是本实验处在特殊时间点,从而导致其摄食种类与其他研究存在一定差异。造成这一差异主要因为马尾藻属生长具有周期性,研究表明亚热带海域硇洲马尾藻(*Sargassum naozhouense* Tseng et Lu)^{8—10}月为停止期,11 月至翌年 4 月中旬为生长期,4 月中旬至 6 月初是繁殖期,6 月初至 7 月底为衰老期^[21]。本研究时间处于 8 月,马尾藻已经开始衰老死亡,这直接影响了紫海胆食物来源。本研究表明紫海胆主要摄食 POM,这主要因为大亚湾最大降雨量在夏季,陆源 POM 随雨水大量流入大亚湾^[22],且大亚湾海域 POM 含量逐年增加^[23],大量马尾藻死亡分解致使 POM 含量显著增加。而底栖滤食性生物主要滤食浮游生物和 POM,宋强等^[24]研究表明在一定浓度范围内滤食性生物摄食率随着沉积物、悬浮颗粒增加而增加。根据表 3 中计算结果得出,在 8 月,条蛭螺、红底星螺、翡翠贻贝、短翼珍珠贝、企鹅珍珠贝等底栖生物主要摄食 POM,

其次为 SOM 和裂叶马尾藻,摄食种类与紫海胆存在重叠,具有一定的食物竞争关系。

3.2 个体规格对紫海胆食性的影响

个体规格差异对海胆食性具有一定影响,Agnetta 等^[25]对乌斯蒂卡岛贫瘠海域和茂密海藻场的海胆研究表明,拟球海胆生活在茂密海藻场使其杂食程度更高,黑海胆生活在贫瘠海域从而导致食性单一。海胆在其整个个体发育过程中经过几次明显的食性转换过程,在浮游幼体期主要摄食浮游性单细胞藻类;变态发育后,营底栖匍匐生活的稚海胆食性也由摄食浮游单细胞藻转为摄食底栖硅藻为主,同时兼食大型海藻配子体、小型孢子体和部分有机碎屑^[26]。本研究分析了紫海胆壳径与碳氮稳定同位素关系,结果发现不同壳径之间碳、氮稳定同位素比值均无显著性差异($P>0.05$)。碳同位素值是食物来源的良好示踪指标^[27],由于文章中不同壳径紫海胆碳同位素无显著性差异,这说明壳径在 28.00~59.98 mm 范围,随壳径增加紫海胆食性并无显著改变。这与采集紫海胆壳径、体重范围较为接近,个体趋于成熟,摄食选择趋于一致,食物来源单一有关。有研究表明中等大小海胆摄食倾向最为明显,活跃程度最高,能通过自身运动对食物进行多项选择^[28];小海胆(<30 mm 壳径)摄食量大于大海胆(30~60 mm 壳径),主要由于小海胆需要消耗更多能量以满足其生长,而大海胆生长速度降低从而消耗量降低^[29],这说明不同规格海胆的摄食需求量和活跃程度存在差异,海胆为满足其生长发育所需要能量对食物种类具有选择性,这也直接影响了海胆的摄食状况。

3.3 紫海胆营养级及其所处食物网位置

应用碳、氮稳定同位素技术研究生物营养级和生态系统食物网关系时, 需要选择某种生物的氮稳定同位素比值作为基准值。选取不同基准生物会通过食物链传递作用影响到生态系统食物网各生物营养级, 一般选取在生态系统常年存在的浮游动物或底栖生物作为基准生物^[30]。Wedchampan 等^[31]在千岛湖和太湖分别选取了浮游动物和贻贝作为基准生物, 由于摄食研究以陆源 POM 为主, 而千岛湖贻贝分布有限, 不能全面覆盖, 所以不适宜作为基准生物。蒋日进等^[32]对枸杞岛近岸海域食物网稳定同位素分析显示, 紫海胆营养级为 2.25, 与文章中营养级 2.11 基本一致。Qu 等^[33]于禁渔期前后对小黑山岛无脊椎动物进行稳定同位素分析, 结果显示紫海胆年均营养级仅为 1.74, 明显小于文章的 2.11。

大亚湾食物网中主要生物种类可划分为悬浮颗粒、初级生产者和初级消费者、次级消费者、顶级消费者 4 个营养组群。Chen 等^[34]通过 Ecopath 模型计算出大亚湾生态系统主要有两条食物链: 一条是牧食食物链, 另一条是碎屑食物链。研究结果表明紫海胆为杂食性生物, 属于次级消费者, 8 月份摄食习性更偏向于悬浮颗粒→初级消费者(浮游动物)→次级消费者(底栖生物)→顶级消费者(游泳动物)的碎屑食物链。Figueiredo 等^[35]研究发现, 亚速尔群岛黑尾重牙鲷(*Diplodus sargus*)和贝氏隆头鱼(*Labrus bergylta*)随着种群丰度和平均尺寸的减小而减少对海胆的捕食, 即摄食大规格海胆生物较少, 大规格紫海胆在食物网中位置相对于小规格海胆更高, 这表明顶级消费者决定着海胆在生态系统中所处食物网位置。

参考文献:

- [1] Chen C. Biology and cultivation of sea urchin *Heliocidaris crassispina*[J]. Ocean and Fishery, 2007(7): 32. [陈锤. 紫海胆的生物学与养殖[J]. 海洋与渔业, 2007(7): 32.]
- [2] Freeman S M. Size-dependent distribution, abundance and diurnal rhythmicity patterns in the short-spined sea urchin *Heliocidaris crassispina*[J]. Estuar Coast Shelf Sci, 2003, 58(4): 703–713.
- [3] Parnell A C, Inger R, Bearhop S, et al. Source partitioning using stable isotopes: coping with too much variation[J]. PLoS ONE, 2010, 5(3): 1–5.
- [4] Bendavid M, Flaherty E A. Stable isotopes in mammalian research: a beginner's guide[J]. J Mammal, 2015, 93(2): 312–328.
- [5] Zheng X Q, Wang Q, Huang L F, et al. Feeding habits for two dominant amphipod species in the Yundang Lagoon based on stable carbon and nitrogen isotope analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(23): 7589–7597. [郑新庆, 王倩, 黄凌风, 等. 基于碳、氮稳定同位素的厦门筴筴湖两种优势端足类食性分析[J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7589–7597.]
- [6] Wang J, Yuan J, Tan X, et al. Stable isotope composition of particulate organic matters and dissolved nitrate in the Jinshui River, Upper Han River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22): 7338–7346. [王婧, 袁洁, 谭香, 等. 汉江上游金水河悬浮物及水体碳氮稳定同位素组成特征[J]. 生态学报, 2015, 35(22): 7338–7346.]
- [7] Zhu M G, Yang G, Zhang T, et al. Feeding habits of *Acanthogobius ommaturus* in the Yangtze Estuary[J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2016, 23(4): 914–923. [朱美贵, 杨刚, 张涛, 等. 长江口斑尾刺虾虎鱼的摄食习性[J]. 中国水产科学, 2016, 23(4): 914–923.]
- [8] Wang J F, Zhao F, Song C, et al. Diet composition and seasonal variation in feeding habits of *Collichthy lucidus* in Yangtze Estuary, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(1): 291–298. [王建峰, 赵峰, 宋超, 等. 长江口棘头梅童鱼食物组成和摄食习性的季节变化[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 291–298.]
- [9] Matsuoka N, Suzuki H. Genetic variation and differentiation in six local Japanese populations of the sea-urchin, *Heliocidaris crassispina*: Electrophoretic analysis of allozymes[J]. Comp Biochem Physiol B: Comp Biochem, 1989, 92(1): 1–7.
- [10] Phillips K, Hamid N, Silcock P, et al. Effect of manufactured diets on the yield, biochemical composition and sensory quality of *Evechinus chloroticus* sea urchin gonads[J]. Aquaculture, 2010, 308(1–2): 49–59.
- [11] Lau D C C, Dumont C P, Lui G C S, et al. Effectiveness of a small marine reserve in southern China in protecting the harvested sea urchin *Heliocidaris crassispina*: a mark- and-recapture study[J]. Biol Conserv, 2011, 144(11): 2674–2683.
- [12] Chen G, Xiang W Z, Lau C C, et al. A comparative analysis of lipid and carotenoid composition of the gonads of *Heliocidaris crassispina*, *Diadema setosum*, and *Salmacis sphaeroides*[J]. Food Chem, 2010, 120(4): 973–977.
- [13] Nie Y K, Chen P M, Zhou Y B, et al. Preliminary study on feeding habits of *Heliocidaris crassispina*[J]. South China Fisheries Science, 2016, 12(3): 1–8. [聂永康, 陈丕茂, 周艳

- 波, 等. 南方紫海胆摄食习性的初步研究[J]. 南方水产科学, 2016, 12(3): 1-8.]
- [14] Sun M Y, Gao X S. The influence of salinity on development and growth of the sea urchin[J]. Journal of Fisheries of China, 1991, 15(1): 72-76. [孙勉英, 高绪生. 盐度对大连紫海胆生长发育的影响[J]. 水产学报, 1991, 15(1): 72-76.]
- [15] Kim N G, Jang J G. Stomach contents of the sea urchins, *Heliocidaris crassispina* and *Hemicentrotus pulcherrimus* and characterization of the marine algal community along the Tongyeong coast of Kor[J]. Kor J Fish Aquat Sci, 2012, 45(6): 686-693.
- [16] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions[J]. Ecology, 2002, 83(3): 703-718.
- [17] Preciado I, Cartes J E, Punzón A, et al. Food web functioning of the benthopelagic community in a deep-sea seamount based on diet and stable isotope analyses[J]. Deep Sea Res II: Topic Stud Oceanogr, 2016: 1-13.
- [18] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources[J]. Oecologia, 2003, 136(2): 261-269.
- [19] Trenzado C E, Hidalgo F, Villanueva D, et al. Study of the enzymatic digestive profile in three species of Mediterranean sea urchins[J]. Aquaculture, 2012, 344: 174-180.
- [20] Yatsuya K, Hiroyuki N. Density, growth and reproduction of the sea urchin *Heliocidaris crassispina* (A. Agassiz) in two different adjacent habitats, the Sargassum area and Corallina area[J]. Fish Sci, 2004, 70(2): 233-240.
- [21] Xie E Y, Jia C, Chen X L, et al. Seasonal variation in length, biomass and reproductive property of *Sargassum naozhouense*[J]. Journal of Fisheries of China, 2011, 35(7): 1015-1022. [谢恩义, 贾桎, 陈秀丽, 等. 硃洲马尾藻的繁殖特性及体长生物量的季节变动[J]. 水产学报, 2011, 35(7): 1015-1022.]
- [22] Wu M L, Wang Y S. Using chemometrics to evaluate anthropogenic effects in Daya Bay, China[J]. Estuar Coast Shelf Sci, 2007, 72(4): 732-742.
- [23] Li X L, Zhou Y P, Xia H Y. Intra- and inter-annual variabilities of particulate organic matter in the Mirs Bay from 2000 to 2010[J]. Environmental Science, 2013, 34(3): 857-863. [李绪录, 周毅频, 夏华永. 2000~2010年大鹏湾颗粒有机物的年变化和年际变化[J]. 环境科学, 2013, 34(3): 857-863.]
- [24] Song Q, Fang J G, Liu H, et al. Studies on the effects of suspended sediment on the feeding physiology of three suspension feeding bivalves[J]. Marine Fisheries Research, 2006, 27(4): 21-28. [宋强, 方建光, 刘慧, 等. 沉积再悬浮颗粒物对3种滤食性贝类摄食生理的影响[J]. 海洋水产研究, 2006, 27(4): 21-28.]
- [25] Agnetta D, Bonaviri C, Badalamenti F, et al. Functional traits of two co-occurring sea urchins across a barren/forest patch system[J]. Journal of Sea Research, 2013, 76: 170-177.
- [26] Chang Y Q, Ding J, Song J, et al. Biology and Cultivation of Sea Cucumber and Sea Urchin[M]. Beijing: China Ocean Press, 2004: 235-269. [常亚青, 丁君, 宋坚, 等. 海参、海胆生物学研究与养殖[M]. 北京: 海洋出版社, 2004: 235-269.]
- [27] Ma Q Y, Han D Y, Liu H, et al. Construction of a continuous trophic spectrum for the food web in jiaozhou bay using stable isotope analyses[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(21): 7207-7218. [麻秋云, 韩东燕, 刘贺, 等. 应用稳定同位素技术构建胶州湾食物网的连续营养谱[J]. 生态学报, 2015, 35(21): 7207-7218.]
- [28] Hart L J, Chia F S. Effect of food supply and body size on the foraging behavior of the burrowing sea urchin *Echinometra mathaei* (de Blainville)[J]. J Exp Mar Biol Ecol, 1990, 135(2): 99-108.
- [29] Heck K L, Valentine J F. Sea urchin herbivory: evidence for long-lasting effects in subtropical seagrass meadows[J]. J Exp Mar Biol Ecol, 1995, 189(1-2): 205-217.
- [30] Zanden M, Rasmussen J B. Variation in $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ trophic fractionation: implications for aquatic food web studies[J]. Limnol Oceanogr, 2001, 46(8): 2061-2066.
- [31] Wedchaparn O, Zhao L, Fan Y, et al. Comparison of the trophic niches between two planktivorous fishes in two large lakes using stable isotope analysis[J]. Biochem Syst Ecol, 2016, 68: 148-155.
- [32] Jiang R J, Zhang S Y, Wang K, et al. Stable isotope analysis of the offshore food web of Gouqi Island[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(4): 930-938. [蒋日进, 章守宇, 王凯, 等. 枸杞岛近岸海域食物网的稳定同位素分析[J]. 生态学杂志, 2014, 33(4): 930-938.]
- [33] Qu P, Pang M, Wang Q X, et al. Influence of timing of fishing on trophic levels and diets of typical fish and invertebrate species in the Bohai Strait over a single year based on carbon and nitrogen isotope analysis[J]. Ecol Indic, 2016, 70: 348-356.
- [34] Chen Z Z, Xu S N, Qiu Y S. Using a food-web model to assess the trophic structure and energy flows in Daya bay, China[J]. Cont Shelf Res, 2015, 111B: 316-326.
- [35] Figueiredo M, Morato T, Barreiros J P, et al. Feeding ecology of the white seabream, *Diplodus sargus*, and the ballan wrasse, *Labrus bergylta*, in the Azores[J]. Fish Res, 2005, 75(1-3): 107-119.

Feeding habits of the purple sea urchin *Heliocidaris crassispina* based on stable carbon and nitrogen isotope analysis

MO Baolin^{1,2,3,4}, QIN Chuanxin^{1,2,3}, CHEN Pimao^{1,2,3}, LI Xiaoguo^{1,2,3}, FENG Xue^{1,2,3}, TONG Fei^{1,2,3}, YUAN Huarong^{1,2,3}

1. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;
2. Key Laboratory of Marine Ranching Technology, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;
3. Scientific Observing and Experimental Station of South China Sea Fishery Resources and Environment, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510300, China;
4. Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China

Abstract: Purple sea urchin *Heliocidaris crassispina* is an important benthic species in the western Pacific Ocean. In recent years, environmental disruption and over-exploitation have damaged the resources of this species. Stable isotope analysis has become a powerful tool for studying the feeding habits of marine animals, and this method can overcome some of the limitations associated with traditional stomach contents analysis. Carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) were used as tools to evaluate the stable isotopic characteristics, trophic levels, shell diameter, and feeding habits of *H. crassispina*, from Daya Bay on the south coast of Guangdong Province, using data collected in August 2015. In the present study, the trophic levels of *H. crassispina* and other benthic species in Daya Bay were based on $\delta^{15}\text{N}$. Average $\delta^{13}\text{C}$ of *H. crassispina* was $-(13.35 \pm 1.21)\text{‰}$, average $\delta^{15}\text{N}$ was $(9.14 \pm 0.38)\text{‰}$, and the trophic levels ranged from 2.09 to 2.13 (mean 2.11); no significant correlation was found between the different shell diameters of the *H. crassispina* sampled and the recorded values of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ ($P > 0.05$). Average $\delta^{13}\text{C}$ values of the potential food sources were between $-(9.93 \pm 1.59)\text{‰}$ and $-(20.76 \pm 1.42)\text{‰}$, and their average $\delta^{15}\text{N}$ values were between $(-0.16 \pm 1.34)\text{‰}$ and 14.99‰ ; the trophic levels ranged from 1.34 to 3.77. Cluster analysis showed that the food web among major species of Daya Bay could be classified into four trophic groups: suspended organic matter, primary producers and primary consumers, secondary consumers, and top predators. There were two main channels in the overall food chain: one was the grazing food chain, and the other was the detritus food chain. *H. crassispina* have a tendency to feed on detritus in August, when corals are scarce, macroalgae density is low, and the terrigenous materials present as particulate organic matter (POM) into Daya Bay follow a period of heavy rains. The main food resources of *H. crassispina* were: POM, sediment organic matter (SOM), the brown macroalgae *Sargassum siliquastrum*, bacillariophyceae (diatoms), zooplankton and phytoplankton. Among these, POM was the most important food item for *H. crassispina*, accounting for 67.3% of its food consumption; the other food categories accounted for 9.7%, 9.3%, 6.7%, 3.7% and 3.3% of its food composition, respectively. Considerable competition exists between *H. crassispina* and the benthos, which suggests urgent efforts are needed to improve this ecological environment as well as to increase the seaweed biomass. Variations in the trophic levels were related to differences in the isotope baseline, and temporal and spatial variations. There was no significant correlation between shell diameter of *H. crassispina* and its feeding habits, perhaps because its food source is relatively singular. Thus, it is evident that feeding habits play an important role in population resource recovery and ecological niches of the system.

Key words: *Heliocidaris crassispina*; stable carbon isotope; nitrogen isotope; feeding habits; Daya Bay

Corresponding author: QIN Chuanxin. E-mail: qincx@scsfri.ac.cn