

Applications of Stable Isotope Methods in Coral Reef Ecosystem Studies

YANG Guohuan^a, SUN Xingli, HOU Xiuqiong, CHEN Chunliang^b

Analytical and Testing Centre of Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China

^a guohuanyang@126.com, ^b f2362900@126.com

Keywords: Stable isotope, trophic level, fish, coral reef ecosystem

Abstract. There are more and more applications using stable isotope technology in foodweb of ocean ecosystem studies. As a typical example, coral reef ecosystem and its fishes were chosen as the study object. Fish samples were sorted and analyzed to make sure which trophic levels they belonged to. The results showed that there were big spans in $\delta^{13}\text{C}$ values and $\delta^{15}\text{N}$ values. $\delta^{13}\text{C}$ values were from -20.98‰ to -9.05‰ , $\delta^{15}\text{N}$ values were $11.66\sim 18.15\text{‰}$. It seemed it was more enriched of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values compared with other sea areas. Trophic levels were calculated by $\delta^{15}\text{N}$ values. The results showed most of fish species in Xuwen Coral Reef were lower carnivores and middle carnivores, the rest were omnivores and higher carnivores. In all fish species, more than a half were lower carnivores, which accounted for 70 species and for 52% of the total species. 47 species belonged to the middle carnivores and accounted for 35%. The omnivores and higher carnivores, respectively, accounted for 11, 8 species and for 8%, 5%. Furthermore, 54 fish species were chosen to compared with those that analyzed by gut-contents analysis. About 85% of the fish species differed less than 0.5 trophic level by 2 methods. It is recommended that stable isotope analysis method can be a useful tool for ocean food web.

稳定同位素在珊瑚礁生态系统的应用研究

杨国欢^a, 孙省利, 侯秀琼, 陈春亮^b

广东海洋大学分析测试中心, 湛江 中国 524088

^a guohuanyang@126.com, ^b f2362900@126.com

关键词: 稳定同位素, 营养级, 鱼类, 珊瑚礁生态系统

中文摘要. 稳定同位素技术在海洋生态系统食物网的研究中已得到越来越多的应用。本文以典型的珊瑚礁生态系统为例, 对 2006 年 9 月至 2007 年 8 月期间在徐闻珊瑚礁海区采集到的鱼类样本运用稳定碳氮同位素方法进行鱼类营养级的分析。结果表明, $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的跨度都很大, $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围为 $-20.98\sim -9.05\text{‰}$, 相差 11.93‰ ; $\delta^{15}\text{N}$ 值的范围为 $11.66\sim 18.15\text{‰}$, 差值达 6.49‰ 。与其它海区相比, $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值显得更为富集。由 $\delta^{15}\text{N}$ 值计算出来的营养级表明, 徐闻珊瑚礁鱼类分布在两端 (杂食性鱼类与高级肉食性鱼类) 的只占少数, 绝大多数居于中间的层次 (低级肉食性鱼类与中级肉食性鱼类)。在 68 种鱼类中, 超过一半的种类是以金钱鱼、多鳞鱧为代表的低级肉食性鱼类, 有 36 种, 占鱼类总数的 53%; 其次是以细鳞鲷、龙头鱼为代表的中级肉食性鱼类, 有 22 种, 占鱼类总数的 32%; 以褐蓝子鱼为代表的杂食性鱼类和以杂食豆齿鳗为代表的高级肉食性鱼类各有 6 种、4 种, 分别占鱼

类总数的 9%和 6%。在此基础上选取了 25 种鱼类与其他海区的胃含物法分析结果作对比,发现约 84%的鱼种采用两种方法测定的结果在 0.5 个营养级的误差范围内一致,只有少数鱼种的差值大于 0.5 个营养级。由此可见稳定同位素分析法与传统的胃含物分析法所得的结果有很好的一致性,稳定同位素分析法是一种研究海洋食物网营养层次的有效方法。

1. 引言

近年来,国外对稳定同位素应用于海洋生态系统的研究技术已日趋成熟^[1-4]。然而,国内在相关方面的研究发展较慢,特别是对典型的珊瑚礁生态系统,极少报道。本文拟以徐闻珊瑚礁生态系统为例,应用稳定同位素技术对生态系统中的鱼类进行营养级的研究,为国内海洋生态系统食物网的稳定同位素研究提供基础资料。

分布在广东省雷州半岛西南部徐闻县和雷州市沿岸一带的珊瑚礁,是我国大陆沿岸面积最大、珊瑚种类最多,连片最为完整的珊瑚礁。据初步调查珊瑚礁有腔肠动物门的珊瑚 18 科 65 种;礁栖无脊椎动物包括软体动物门、节肢动物门、腔肠动物门等的 55 科 115 种^[5],鱼类 2 纲 13 目 55 科 135 种^[6]。目前对徐闻珊瑚礁的研究报道尚不多见^[7-9],对徐闻珊瑚礁的海洋生物食物网的研究未见报道。本文在初步确定珊瑚礁鱼类组成的基础上,利用碳氮稳定同位素对鱼类的营养级进行研究,期望能为珊瑚礁生态系统的保护与生态修复、合理开发利用资源及科学管理提供依据。

2. 材料与方法

2.1 样品采集与前处理

2006 年 9 月至 2007 年 8 月期间于徐闻珊瑚礁保护区的试验区和核心区(见图 1)设点,按夏、秋、冬、春四个季节进行采样,试验区以定置网作业为主,核心区以刺网作业为主。除采集鱼类样品外同时兼顾浮游植物、浮游动物等重要珊瑚礁栖息种类,使用浅水 III 型浮游生物网和 I 型浮游生物网以水平拖网方式采集。调查船速约为 1~2 节,每次拖网时间 30min 左右,直至所采集的样品量足够分析时为止。

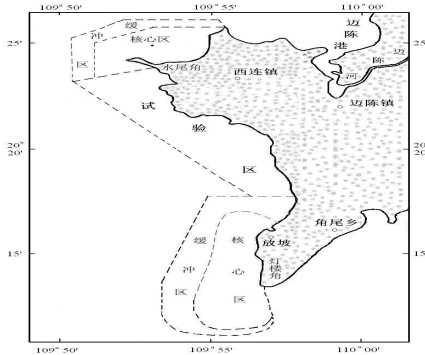


Figure 1. map of sampling area in the Xuwen Coral Reef

图1 徐闻珊瑚礁保护区示意图

鱼类样本取其适量背部肌肉冷冻干燥后,用 10% HCl 浸泡 3~4 小时以去除无机碳,再次冻干后磨成粉末待用。浮游生物样品在过滤海水中清养 1~2h 后,过滤在筛绢上,剔除肉眼明显可见的杂质。浮游植物样品在生物显微镜下尽量挑出混杂其中的浮游动物。经挑选后的浮游生物样品在均匀混合后,在真空干燥器中脱水干燥后用作同位素分析。

2.2 样品分析

将粉末状样品按测试要求准确称取于锡杯中，然后将其压成无棱角圆球状（不留空气）。包好的样品依次放入英国 SerCon 20-20H 型连续流同位素质谱仪的自动进样器中，经气化、纯化、电离等一系列的分析直至结果的输出。碳、氮稳定同位素比值用国际通用的 δ 值表示，分别以 VPDB 国际标准和大气氮作为参考标准。 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 可按以下公式算出：

$$\delta^{13}\text{C}(\text{‰}) = \left(\frac{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{sample}}}{^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{VPDB}}} - 1 \right) \times 1000$$

$$\delta^{15}\text{N}(\text{‰}) = \left(\frac{^{15}\text{N}/^{14}\text{N}_{\text{sample}}}{^{15}\text{N}/^{14}\text{N}_{\text{air}}} - 1 \right) \times 1000$$

式中， $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}_{\text{VPDB}}$ 为国际标准物 VPDB (Vienna Peedee Belemnite) 的碳同位素比值， $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}_{\text{air}}$ 为标准大气氮同位素比值。 $\delta^{13}\text{C}$ 值的分析精度为 $\pm 0.08\text{‰}$ ， $\delta^{15}\text{N}$ 值的分析精度为 $\pm 0.04\text{‰}$ 。

营养级 (trophic level) 的确定采用如下公式计算：

$$\text{T.L.} = (\delta^{15}\text{N}_{\text{sample}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}) / \Delta^{15}\text{N} + 1$$

其中， $\delta^{15}\text{N}_{\text{sample}}$ 表示鱼类氮稳定同位素比值； $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 表示浮游动物氮稳定同位素平均比值，本文取 10.64‰ ； $\Delta^{15}\text{N}$ 表示一个营养级的氮富集度，本文取 2.5‰ ；初级生产者的营养级定为 0。

3. 结果与分析

3.1 徐闻珊瑚礁各种鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 $\delta^{15}\text{N}$ 值

本研究对徐闻珊瑚礁保护区的 68 种鱼类进行了稳定碳、氮同位素组成的测定，结果表明， $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的跨度都很大， $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围为 -20.98 (细鳞鲷 *Terapon jarbus*) $\sim -9.05\text{‰}$ (黑斑鲱鲤 *Upeneus tragula*)，相差 11.93‰ ； $\delta^{15}\text{N}$ 值的范围为 11.66 (小燕鳐 *Cypselurus brevis*) $\sim 18.15\text{‰}$ (沙带鱼 *Lepturacanthus savala*)，差值达 6.49‰ 。与其它海区相比，徐闻珊瑚礁鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值跨度最大，而 $\delta^{15}\text{N}$ 值则呈现出更为富集的特点 (表 1)，整体上两者都比其它海区的更为富集。

Table.1 $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ value spans of fishes in the and other sea areas
表 1. 徐闻珊瑚礁鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 $\delta^{15}\text{N}$ 值分布与其它海区的比较

δ 值分布 / ‰ δ value spans / ‰	徐闻珊瑚礁 the Xuwen Coral Reef	黄东海 ^[10] Yellow Sea and the East China Sea	渤海湾 ^[11] Bohai Bay	崂山湾 ^[12] Laoshan Bay
$\delta^{13}\text{C}$	$(-20.98 \sim -9.05)$	$(-23.14 \sim -15.17)$	$(-17.99 \sim -11.08)$	$(-19.9 \sim -16.3)$
$\delta^{15}\text{N}$	$11.66 \sim 18.15$	$7.13 \sim 14.30$	$9.97 \sim 13.98$	/

$\delta^{15}\text{N}$ 值最大的沙带鱼的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 $-18.25 \sim -14.49$ ，而 $\delta^{13}\text{C}$ 值最大的黑斑鲱鲤的 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 $14.97 \sim 17.02$ ，两个范围都处于整个鱼类 δ 值范围的中间位置左右， $\delta^{15}\text{N}$ 值没有随着 $\delta^{13}\text{C}$ 值的增大而增大， $\delta^{13}\text{C}$ 值亦没有随着 $\delta^{15}\text{N}$ 值的增大而增大。

3.2 徐闻珊瑚礁鱼类的营养级

国内学者对海洋食物网营养级的划分大多采用 0-4 级的划分标准^[13-15]。经公式计算出的各营养级可看出，徐闻珊瑚礁鱼类分布在两端 (杂食性鱼类与高级肉食性鱼类) 的只占少数，绝大多数居于中间的层次 (为低级肉食性鱼类与中级肉食性鱼类)，具体见表 2。

Table 2. $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ values and trophic levels of fishes in the Xuwen Coral Reef
 表 2. 徐闻珊瑚礁鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 $\delta^{15}\text{N}$ 值、营养级及样品数 n

种 类 species	$\delta^{13}\text{C}$ 值/‰ $\delta^{13}\text{C}$ values/‰	$\delta^{15}\text{N}$ 值/‰ $\delta^{15}\text{N}$ values/‰	营养级 trophic levels		n
			范 围 spans	平均值 average	
1 小燕鲛 <i>Cypselurus brevis</i>	-17.40	11.66	1.41	1.41	1
2 青羽裸胸鲂 <i>Caranx coeruleopinnatus</i>	-16.45	12.24	1.64	1.64	1
3 褐蓝子鱼 <i>Siganus fuscescens</i>	-15.47~-12.36	12.14~13.01	1.60~1.95	1.78	2
4 峨眉条鲷 <i>Zebrias quagga</i>	-15.99	12.68	1.82	1.82	1
5 平鲷 <i>Rhabdosargus sarba</i>	-15.07	12.82	1.87	1.87	1
6 南海红娘鱼 <i>Lepidotrigla marisinsensis</i>	-16.22	13.12	1.99	1.99	1
712 中华单角鲂 <i>Monacanthus chinensis</i>	-15.11	13.20	2.02	2.02	1
8 乔氏吻鲈 <i>Rhynchorhamphus georgii</i>	-17.94~-16.58	13.28~13.33	2.06~2.08	2.07	2
9 孔鰕虎鱼 <i>Trypauchen vagina</i>	-17.50	13.38	2.10	2.10	1
10 丝鳍美尾(鱼衍) <i>Calliurichthys dorysus</i>	-12.82	13.46	2.13	2.13	1
11 斑鲻 <i>Hemiramphus far</i>	-15.98	13.54	2.16	2.16	1
12 东方箸鲷 <i>Brachirus orientalis</i>	-11.21	13.65	2.20	2.20	1
13 黄斑蓝子鱼 <i>Siganus oramin</i>	-15.92~-14.09	13.20~14.29	2.02~2.46	2.23	3
14 朴蝴蝶鱼 <i>Chaetodon modestus</i>	-15.19	13.81	2.27	2.27	1
15 黑斑鲻 <i>Leiognathus daura</i>	-16.78	13.87	2.29	2.29	1
16 短棘银鲈 <i>Gerres lucidus</i>	-16.87~-16.43	13.75~14.09	2.24~2.38	2.31	2
17 康氏侧带小公鱼 <i>Stolephorus commersonii</i>	-14.66	13.96	2.33	2.33	1
18 短棘鲻 <i>Leiognathus equulus</i>	-11.86	14.13	2.40	2.40	1
19 日本十棘银鲈 <i>Gerreomorpha japonica</i>	-15.73~-13.93	13.25~14.81	2.04~2.67	2.41	2
20 四指马鲛 <i>Eleutheronema tetradactylum</i>	-15.30~-14.31	13.39~15.54	2.10~2.96	2.43	3
21 海南鲯鲳 <i>Chorinemus hainanensis</i>	-16.44	14.29	2.46	2.46	1
22 勒氏短须石首鱼 <i>Umbrina russelli</i>	-16.17~-13.80	14.24~14.67	2.44~2.61	2.53	2
23 长棘银鲈 <i>Gerres filamentosus</i>	-15.27~-12.84	14.03~15.03	2.36~2.76	2.57	3
24 裘氏小沙丁鱼 <i>Sardinella jussieu</i>	-15.48~-14.50	14.53~14.71	2.56~2.63	2.60	2
25 胡椒鲷 <i>Plectorhynchus pictus</i>	-14.05	14.72	2.63	2.63	1
26 长颌棱鲷 <i>Thryssa setirostris</i>	-14.88	14.03~15.27	2.36~2.85	2.64	4
27 强棘银鲈 <i>Gerreomorpha poeti</i>	-15.92~-13.11	14.43~15.18	2.52~2.82	2.67	2
28 金钱鱼 <i>Scatophagus arus</i>	-15.08~-14.18	12.95~15.93	1.92~3.12	2.67	5
29 孔鲷 <i>Cymbacephalus nematophthalmus</i>	-13.30	14.81	2.67	2.67	1
30 短鳍红娘鱼 <i>Lepidotrigla micropterus</i>	-15.86	14.86	2.69	2.69	1
31 云斑海猪鱼 <i>Halichoeres nigrescens</i>	-16.11~-13.11	14.46~15.39	2.53~2.90	2.73	2
32 海鲋 <i>Muraenesox cinereus</i>	-16.31~-14.78	14.88~15.22	2.70~2.83	2.77	2
33 印度鲷 <i>Ilisha indica</i>	-17.43~-16.02	14.72~15.47	2.63~2.93	2.78	2
34 多鳞鱧 <i>Sillago sihama</i>	-16.92~-14.15	14.91~15.25	2.71~2.84	2.78	3
35 花鰻鲡 <i>Anguilla marmorata</i>	-10.65	15.13	2.80	2.80	1
36 南海(鱼衍) <i>Callionymus marisinsensis</i>	-15.61	15.13	2.80	2.80	1

37 丝背细鳞鲷 <i>Stephanolepis cirrifer</i>	-16.43~-14.98	14.65~15.62	2.60~2.99	2.80	2
38 龙头鱼 <i>Harpodon nehereus</i>	-17.13~-13.58	13.83~15.73	2.28~3.04	2.81	3
39 赤鲷 <i>Dasyatis akajei</i>	-15.44~-14.04	14.64~15.79	2.60~3.06	2.83	2
40 浅色黄姑鱼 <i>Nibea chui</i>	-14.80	15.27	2.85	2.85	1
41 卵鲷 <i>Solea ovata</i>	-14.53~-11.73	14.98~15.52	2.74~2.95	2.85	2
42 中国鲳 <i>Pampus chinensis</i>	-15.23	15.35	2.88	2.88	1
43 鲷 <i>Platycephalus indicus</i>	-15.61~-13.86	15.03~15.79	2.76~3.06	2.91	3
44 美体紫胸鱼 <i>Stethojulis kalosoma</i>	-11.68	15.49	2.94	2.94	1
45 尖嘴鲷 <i>Dasyatis zujei</i>	-13.80~-13.60	15.44~15.71	2.92~3.03	2.98	3
46 匀斑裸胸鲷 <i>Gymnothorax reevesi</i>	-14.09~-13.04	14.75~16.44	2.64~3.32	2.98	2
47 银鲳 <i>Pampus argenteus</i>	-20.40~-14.39	14.85~15.96	2.68~3.13	2.99	7
48 赫氏海猪鱼 <i>Halichoeris hyrtli</i>	-11.46	15.69	3.02	3.02	1
49 黑尾舌鲷 <i>Cynoglossoides melampetalus</i>	-15.47	15.77	3.05	3.05	1
50 中华海鲈 <i>Arius sinensis</i>	-17.97~-12.57	14.58~16.43	2.58~3.32	3.06	9
51 横带髯鲷 <i>Hapalogenys mucronatus</i>	-16.55~-14.22	14.88~16.65	2.70~3.40	3.07	3
52 点带石斑鱼 <i>Epinephelus malabaricus</i>	-11.03	15.87	3.09	3.09	1
53 丽叶鲷 <i>Atule kalla</i>	-16.43~-14.92	15.79~16.13	3.06~3.20	3.11	3
54 单带眶棘鲈 <i>Scolopsis monogramma</i>	-13.19	15.98	3.14	3.14	1
55 汉氏棱鲳 <i>Thryssa hamiltonii</i>	-17.19~-16.34	16.00~16.05	3.14~3.16	3.15	2
56 长吻丝鲷 <i>Alectic indica</i>	-13.64	16.11	3.19	3.19	1
57 中华小公鱼 <i>Stolephorus chinensis</i>	-14.75	16.15	3.20	3.20	1
58 黑斑鲷 <i>Upeneus tragula</i>	-15.35~-9.05	14.97~17.02	2.73~3.55	3.21	7
59 马六甲鲷 <i>Upeneus moluccensis</i>	-14.78	16.25	3.24	3.24	1
60 无斑圆颌针鱼 <i>Tylosurus leiurus</i>	-13.00	16.26	3.25	3.25	1
61 大黄鱼 <i>Pseudosciaena crocea</i>	-18.71~-14.72	15.54~17.12	2.96~3.59	3.31	10
62 细鳞鲷 <i>Terapon jarbus</i>	-20.98~-12.00	14.60~17.34	2.58~3.68	3.35	6
63 斑鲳 <i>Sillago maculata</i>	-10.74	16.69	3.42	3.42	1
64 花尾燕鲷 <i>Gymnura poecilura</i>	-12.86	16.77	3.45	3.45	1
65 小带鱼 <i>Eupleurogrammus muticus</i>	-17.32~16.62	15.97~18.13	3.13~4.00	3.57	2
66 细颌鳗 <i>Oxyconger leptognathus</i>	-13.84	17.13	3.60	3.60	1
67 沙带鱼 <i>Lepturacanthus savala</i>	-18.25~-14.49	17.19~18.15	3.62~4.00	3.80	8
68 杂食豆齿鳗 <i>Pisoodonophis boro</i>	-15.17	18.02	3.95	3.95	1

由 $\delta^{15}\text{N}$ 值计算出来的营养级表明, 徐闻珊瑚礁的 68 种鱼类中大部分是以金钱鱼 (*Scatophagus arus*)、多鳞鲳 (*Sillago sihama*) 为代表的低级肉食性鱼类, 有 36 种, 占鱼类总数的 53%; 其次是以细鳞鲷、龙头鱼 (*Harpodon nehereus*) 为代表的中级肉食性鱼类, 有 22 种, 占鱼类总数的 32%; 以褐篮子鱼 (*Siganus fuscescens*) 为代表的杂食性鱼类和以杂食豆齿鳗 (*Pisoodonophis boro*) 为代表的高级肉食性鱼类各有 6 种、4 种, 分别占鱼类总数的 9% 和 6%。这种中间大、两头小的营养级模型在其他海域中也普遍存在^[16~18]。事实上, 这与一般生态系统的金字塔模型并不矛盾, 因为杂食性鱼类与低级肉食性鱼类共同作为初级消费者构成金字塔的底部, 只是在这个划分标准中把它们分开了。

3.3 本文鱼类营养级与其他海区胃含物法分析结果的比较

有相关研究通过胃含物分析法对南沙岛礁周围水域^[16]、厦门东海域^[17]、长江口^[18]、南海北部湾^[19]等地的鱼类分析并确定其营养级, 为了比较稳定同位素分析法与传统的胃含物法所

得结果的差异，本文随机选取了有可比数据的 25 种鱼类与之比较（表 3）。

Table 3. comparison of the stable isotope analysis and the gut content analysis method
表 3. 稳定同位素分析法与胃含物分析法所得结果的比较

种 类 species	胃含物分析结果 results from gut content analysis	由 $\delta^{15}\text{N}$ 计算而得的营养级 results calculated by $\delta^{15}\text{N}$ values
1 褐蓝子鱼 <i>Siganus fuscescens</i>	1.6	1.78
2 平鲷 <i>Rhabdosargus sarba</i>	2.1	1.87
3 日本十棘银鲈 <i>Gerreomorpha japonica</i>	2.3	2.41
4 勒氏短须石首鱼 <i>Umbrina russelli</i>	2.3	2.53
5 裘氏小沙丁鱼 <i>Sardinella jussieui</i>	2.3	2.60
6 短鳍红娘鱼 <i>Lepidotrigla micropterus</i>	2.3	2.69
7 短棘银鲈 <i>Gerres lucidus</i>	2.4	2.31
8 多鳞鳢 <i>Sillago sihama</i>	2.4	2.78
9 丽叶鲷 <i>Atule kalla</i>	2.4	3.11
10 长颌棱鳀 <i>Thryssa setirostris</i>	2.5	2.64
11 鲷 <i>Platycephalus indicus</i>	2.5	2.91
12 康氏侧带小公鱼 <i>Stolephorus commersonii</i>	2.6	2.33
13 中华海鲷 <i>Arius sinensis</i>	2.6	3.06
14 汉氏棱鳀 <i>Thryssa hamiltonii</i>	2.7	3.15
15 马六甲鲱鲤 <i>Upeneus moluccensis</i>	2.8	3.24
16 龙头鱼 <i>Harpodon nehereus</i>	3.0	2.81
17 尖嘴魮 <i>Dasyatis zujei</i>	3.0	2.98
18 大黄鱼 <i>Pseudosciaena crocea</i>	3.0	3.31
19 细鳞鲷 <i>Terapon jarbus</i>	3.0	3.35
20 杂食豆齿鳗 <i>Pisoodonophis boro</i>	3.0	3.95
21 长蛇鲻 <i>Saurida elongata</i>	3.2	3.10
22 金钱鱼 <i>Scatophagus arus</i>	3.4	2.67
23 海鳗 <i>Muraenesox cinereus</i>	3.4	2.77
24 点带石斑鱼 <i>Epinephelus malabaricus</i>	3.4	3.09
25 细颌鳗 <i>Oxyconger leptognathus</i>	3.4	3.60

从表 3 中可看出，稳定同位素分析法与传统的胃含物分析法所得的结果有很好的一致性。对所收集到的可比较数据的 25 种鱼种而言，约 84% 的鱼种采用两种方法分析的结果在 0.5 个营养级的误差范围内一致，只有少数鱼种的差值大于 0.5 个营养级。在相差比较大的几种鱼中，有些可能与所采集鱼标本的体长/体重过小有关。由于鱼类的稳定碳氮同位素与其所处的生命阶段有很大的关系，摄取的食物不同，幼鱼与成鱼也会处于不同的营养级。另一个可能的原因是采集样本的季节不同、所在的海域环境不同^[20-22]，因此，可能有比较大的营养位置的跨度。最后，胃含物分析法的数据来自文献，没有进行营养吸收等校正，这也可能造成偏差^[10]。

4. 讨论

蔡德陵等人^[12]对崂山湾的水体生态系统食物网进行了¹³C/¹²C值的研究，发现从处于食物网底部的浮游植物到最高级的肉食性鱼类存在有重要的¹³C富集作用，由同位素推断的生物营养级位置与食性分析的结果也基本上一致。然而， $\delta^{13}\text{C}$ 值最小的细鳞鲷 (-20.98‰) 与 $\delta^{13}\text{C}$ 值最大的黑斑鲷 (-9.05‰) 营养级（平均值）只相差 0.14 级，两种鱼都属于中级肉食性鱼类，因此，本文不能由 $\delta^{13}\text{C}$ 值计算各鱼类的营养级。数据反映出徐闻珊瑚礁鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值并没有随营养级的升高而递增，这与万祎等人^[10]在渤海、郭卫东等人^[23]在南沙渚碧礁及Hobson等人^[24]在北冰洋的研究结果一致，认为 $\delta^{13}\text{C}$ 值在研究的海洋生态系统中并没有稳定的富集作用。

稳定氮同位素组成在用于确定生态系统中各生物种的营养位置的应用已经得到公认。从理论上说,讨论海洋生态系统中各生物种属的营养位置应该以浮游植物为基准,因为浮游植物是海洋生态系统的初级生产力,是海洋食物网的基础,其营养级通常被定为 0。但是浮游植物的稳定氮同位素值随时间、空间的变化范围很大,在计算营养级时并不采用浮游植物的同位素值进行计算。一般采用生态系统中常年存在、食性简单的浮游动物或底栖动物等消费者作为基线生物^[25]。本文选择作为初级捕食者的浮游动物作为参考,实验测得浮游动物的稳定氮同位素的平均值为 10.64‰,以此作为计算营养级的基线值(baseline)。关于基线 $\delta^{15}\text{N}$ 值的选择, Vander Zanden 等人^[26]和 Cabana 等人^[27]建议用珠蚌这一类初级消费者的同位素值进行基线校正,原因是这些食植动物的同位素值的变化范围相对较小。蔡德陵等^[12]选择贻贝进行基线校正,其氮同位素测定值为 6.05‰,与李红燕^[28]选择的中华哲水蚤这种食植浮游动物的同位素值(测定平均值为 $6.95 \pm 0.28\%$)大致接近。然而,可能是由于地域差异性 or 徐闻珊瑚礁生态系的特殊性,生活在其中的生物从低等的浮游植物($\delta^{15}\text{N}$ 值为 8.27‰)到高等的鱼类都含有较高的 $\delta^{15}\text{N}$ 值,如果采用以上建议值就可能造成很大的偏差,而本实验测得浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值处于浮游植物与鱼类的中间,所以,可以认为采用浮游动物的氮同位素平均值作为计算营养位置的基线值是合理的。

稳定同位素分析法根据消费者稳定同位素比值与其食物相应同位素比值相近的原则来判断此生物的食物来源,进而确定食物贡献,能更准确地提供食物的综合信息和揭示摄食者实际同化的食物,反映生物长期生命活动的结果。根据本文稳定同位素法与胃含物分析法的对比结果可以认为,稳定同位素分析法是一种研究海洋食物网营养层次的有效方法,可为今后研究海洋生物的长期摄食行为提供更有利的工具。

致谢

本论文得到广东省科技计划项目(2006B36501009)、广东省自主创新重大科技专项(2007A03260004)的共同资助。

References

- [1] Muir D, Savinova T, Savinov V, et al. Bioaccumulation of PCBs and chlorinated pesticides in seals, fishes and invertebrates from the White Sea, Russia[J]. *The Science of the Total Environment*, 2003, 306: 111-131.
- [2] Satterfield IV F R, Finney B P. Stable Isotope Analysis of Pacific Salmon: Insight into Trophic Status and Oceanographic Conditions over the Last 30 Years[J]. *Progress in Oceanography*, 2002, 53: 232-245.
- [3] Morato T, Sola E, Gros MP, et al. Diets of thornback ray (*Raja clavata*) and tope shark (*Galeorhinus galeus*) in the bottom longline fishery of the Azores, northeastern Atlantic[J]. *FISHERY BULLETIN*, 2003, 101(3): 590-602.
- [4] Takai N, Hirose N, Osawa T, et al. Carbon source and trophic position of pelagic fish in coastal waters of south-eastern Izu Peninsula, Japan, identified by stable isotope analysis[J]. *FISHERIES SCIENCE*, 2007, 73(3): 593-608.
- [5] Lu Huosheng, He Xiuling, Xuan Liqiang, et al. Distribution of Invertebrates Inhabited in the Coral Reef of Xuwen County[J]. *Journay of Zhanjiang Ocean University*, 2004, 24(6), P24-27.
卢伙胜,何秀玲,宣立强,等.徐闻珊瑚礁礁栖无脊椎动物分布[J].*湛江海洋大学学报*, 2004, 24(6): 24-27.
- [6] Yang Guohuan, Hou Xiuqiong, Chen Chunliang, et al. A Preliminary Study on Fish Species

Composition in the Coral Reef of Xuwen County[J]. Fishery Science, 2008, 27(10), P533-538.

杨国欢, 侯秀琼, 陈春亮, 等. 徐闻珊瑚礁鱼类种类组成初步研究[J]. 水产科学, 2008, 27(10), P533-538.

- [7] Zhang Jibiao, Chen Chunliang, Qu Niandong, et al. Spatio-temporal Distribution of Nutrients in the Xuwen Coral Reef[J]. Journay of Guangdong Ocean University, 2008, 28(1), P44-48.

张际标, 陈春亮, 曲念东, 等. 徐闻珊瑚礁保护区营养盐时空分布特征[J]. 广东海洋大学学报, 2008, 28(1): 44-48.

- [8] Xie Qun, Zhao Lirong, Sun Xingli, et al. The Primary Investigation of PAHs in Seawater from Xuwen Coral Reef Natural Reserve[J]. Envirenmental Science and Manegement, 2008, 33(5), P34-37.

谢群, 赵利容, 孙省利, 等. 徐闻珊瑚礁保护区海水中多环芳烃的初探[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(5): 34-37.

- [9] Zhang Caixue, Sun Xingli, Xie Weiliang, et al. Seasonal Changes of the Phytoplankton in Xunwen Coral Reef Area[J]. Oceanologia ET Limnologia Sinica, 2009, 40(2): 159-164.

张才学, 孙省利, 谢良伟, 等. 徐闻珊瑚礁区浮游植物的季节变化[J]. 海洋与湖沼, 2009, 40(2): 159-164.

- [10] Cai Deling, Li Haiyan, Tang Qisheng, et al. The Constrction of Ecosystem Foodweb Trophics in Yellow Sea and the East China Sea-Results from Carbon and Nitrogen Stable Isotope Method[J]. Science in China Ser C Life Science, 2005, 35 (2), P123-130.

蔡德陵, 李海燕, 唐启升, 等. 黄东海生态系统食物网连续营养谱的建立—来自碳氮稳定同位素方法的结果[J]. 中国科学(C 辑: 生命科学), 2005, 35 (2): 123-130.

- [11] Wan Yi, Hu Jianying, An Lihui, et al. Using Stable Carbon and Nitrogen Isotopes to Analyse Trophic Levels of Main Species in Bohai Bay[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(7), P708-711.

万祎, 胡建英, 安立会, 等. 利用稳定氮和碳同位素分析渤海湾食物网主要生物种的营养层次[J]. 科学通报, 2005, 50(7): 708-711.

- [12] Cai Deling, Meng Fan, Han Yibing, et al. STUDIES ON $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$ RATIOS AS A TRACER FOR FOOD WEB IN A MARINE ECOSYSTEM-THE TROPHIC RELATINS IN PELAGIC FOOD WEBS IN LAOSHAN BAY[J]. Oceanologia ET Limnologia Sinica, 1999, 30(6), P671-678.

蔡德陵, 孟凡, 韩贻兵, 等. $^{13}\text{C} / ^{12}\text{C}$ 比值作为海洋生态系统食物网示踪剂的研究—崂山湾水体生物食物网的营养关系[J]. 海洋与湖沼, 1999, 30(6): 671-678.

- [13] Zhang Qiyong, Zhang Yazhi. Preliminary Stedy on Seasonal Changes of Species Conpositions of Demersal Fish in South-Fujian Taiwan Bank Fishing Groud[J]. Acta Scientiarum Naturalium Unisersitatis Amoiensis, 1982, 25(6), P712-720.

张其永, 张雅芝. 闽南-台湾浅滩底拖网鱼类组成季节变化的初步探讨[J]. 厦门大学学报, 1982, 25(6): 712-720.

- [14] Wei Yi, Jiang Weiming. Study on Fish Foodweb of Yellow Sea[J]. Oceanologia ET Limnologia Sinica, 1992, 23 (2), P182-192.

韦晟, 姜卫民. 黄海鱼类食物网的研究[J]. 海洋与湖沼, 1992, 23 (2): 182-192.

- [15]Zhang Yazhi, Li Fuzhen, Liu Xiangyang, et al. Study on Fish Foodweb of Dongshan Bay[J]. *Journey of Oceanography in Taiwan Strait*, 1994,13(1), P52-61.
张雅芝,李福振,刘向阳,等. 东山湾鱼类食物网研究[J]. *台湾海峡*,1994,13(1): 52-61.
- [16]Zhang Yueping, Chen Pimao. Main fishes food web in the adjacentwaters area of Nansha Islands and reefs[J]. *South China Fisheries Science*, 2005,1(6), P23-33.
张月平,陈丕茂.南沙岛礁周围水域主要鱼类食物网研究[J]. *南方水产*,2005,1(6): 23-33.
- [17]Huang Liangming, Zhang Yazhi, Pan Jiajia, et al. Study on Fish Foodweb of East Xiamen Sea Area[J]. *Journey of Oceanography in Taiwan Strait*, 2008,27(1), P64-73.
黄良敏,张雅芝,潘佳佳,等. 厦门东海域鱼类食物网研究[J]. *台湾海峡*,2008,27(1): 64-73.
- [18]Luo Bingzheng, Wei Yi, Dou Shuozeng. Study on Foodweb and Trophic Structure of Fish in Changjiang River Estuary[J]. *Studia Marine Sinica*, 1997,38(1), P143-153.
罗秉征,韦晟,窦硕增. 长江口鱼类食物网与营养结构的研究[J]. *海洋科学集刊*,1997,38(1): 143-153.
- [19]Zhang Yueping. Foods web for main fishes in Beibu Gulf of the South China Sea[J]. *Journey of Fisheries of China*, 2005,12(5), P621-631.
张月平. 南海北部湾主要鱼类食物网[J]. *中国水产科学*, 2005, 12(5): 621-631.
- [20]Xie Songguang, Cui Yipo, Li Zhongjie. Studies on Resource Utility Pattens of Lake Fish Communities: Progress and Method[J]. *Acta Hydrobiology Sinica*,2003,27(1),P77-84.
谢松光,崔奕波,李钟杰. 湖泊鱼类群落资源利用格局研究进展与方法[J]. *水生生物学报*,2003,27(1): 77-84.
- [21]Zhang Tanglin, Li Zhongjie, Cao Wenxuan. Advances in studies on the ecomorphology of fish[J]. *Journey of Fisheries of China*, 2008,32(1), P152-160.
张堂林,李忠杰,曹文宣. 鱼类生态形态学研究进展[J]. *水产学报*,2008,32(1): 152-160.
- [22]Lu Huosheng, Ou Fan, Yan Yunrong, et al. Study on trophic level of m ain fishes in the Leizhou Bay with stable nitrogen isotope techniques[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009,31(3), P167-174.
卢伙胜,欧帆,严云榕,等. 应用氮稳定同位素技术对雷州湾海域主要鱼类营养级的研究[J]. *海洋学报*, 2009,31(3): 167-174.
- [23]Guo Weidong, Yang Yiping, Wu Linxing, et al. Stable carbon isotope study on trophic relationships of Zhubi reef ecosystem in Nansha Island[J]. *Journey of Oceanography in Taiwan Strait*, 2001,21(1),P94-101.
郭卫东,杨逸萍,吴林兴,等. 南沙诸碧礁生态系营养关系的稳定碳同位素研究[J]. *台湾海峡*,2001,21(1): 94-101.
- [24]Hobson K A, Welch H E. Determination of trophic relationships within a high arctic marine food web using $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis[J]. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*,1992, 84: 9-18.
- [25]Vender Zanden M J,Joseph B R.Variation in the $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ trophic fractionation:Implications for aquatic food web studies[J]. *Limnol Ocean*, 2001,46(8):2061-2066.
- [26]Vander Zanden M J,Cabana G,Rasmussen J B.Comparing trophic position of freshwater fish calculated using stable nitrogen isotope ratios $\delta^{15}\text{N}$ and literature dietary data[J].*Canadian*

Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1997,54:1142-1158.

[27] Cabana G, Rasmussen J R. Comparing aquatic food chains using nitrogen isotopes[J]. Proceedings National Academic Science USA, 1996,93: 10844-10847.

[28] Li Haiyan. The Application of Stable Carbon and Nitrogen Isotopes to Ecosystems-such as the Wudinghe River and the Yellow Sea and East China Sea[D]. Tsingdao, China Ocean University, 2003.

李海燕. 稳定碳、氮同位素在生态系统中的应用研究-以无定河、黄东海生态系统为例[D]. 青岛:中国海洋大学, 2003.