

DOI: 10.5846/stxb201407071390

鹿志创, 田甲申, 王召会, 马志强, 韩家波, 高天翔. 应用碳氮稳定同位素技术研究江豚 (*Neophocaena asiaeorientalis* ssp. *sunameri*) 食性. 生态学报, 2016, 36(1): - .

Lu Z C, Tian J S, Wang Z H, Ma Z Q, Han J B, Gao T X. Using stable isotope technique to study feeding habits of the finless porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis* ssp. *sunameri*). Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(1): - .

应用碳氮稳定同位素技术研究江豚 (*Neophocaena asiaeorientalis* ssp. *sunameri*) 食性

鹿志创^{1,2}, 田甲申², 王召会², 马志强², 韩家波^{2,*}, 高天翔¹

1 中国海洋大学海洋生物多样性与进化研究所, 青岛 266003

2 辽宁省海洋水产科学研究院, 辽宁省海洋生物资源和生态学重点实验室, 大连 116023

摘要: 稳定同位素技术已广泛地用于分析生态系统中食物网的食物来源和营养级关系, 但在海洋哺乳动物食性方面应用较少。通过分析 2012 年 4 月—6 月在辽东湾沿岸海域搁浅而死亡的江豚样本和同时期 (6 月) 取自辽东湾海域主要渔获物的碳氮稳定同位素比值, 研究了江豚 (*Neophocaena asiaeorientalis* ssp. *sunameri*) 及其可能摄食饵料的碳氮稳定同位素组成。结果表明: 江豚 $\delta^{13}\text{C}$ 值为 $(-18.4 \pm 0.3)\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 值为 $(13.8 \pm 0.4)\text{‰}$ 。28 种可能生物饵料的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围为 -19.5‰ — -17.0‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 值的范围为 11.4‰ — 14.0‰ 。江豚的营养级为 4.5, 高于传统胃含物分析法的研究结果。28 种测试生物的营养级位于 3.8—4.6 之间。江豚的食物来源主要以鱼类为主, 对食物种类的喜食顺序为中上层鱼类 > 中下层鱼类 > 底层鱼类 > 头足类 > 虾类 > 蟹类, 其平均贡献率分别为 43.9%、18.2%、13.1%、10.0%、8.8%、6.0%。江豚碳氮稳定同位素比值与体长无明显的线性关系, 碳营养源较为稳定, 氮营养源复杂多变。

关键词: 江豚; 碳氮稳定同位素; 食性; 贡献率; 辽东湾

Using stable isotope technique to study feeding habits of the finless porpoise (*Neophocaena asiaeorientalis* ssp. *sunameri*)

LU Zhichuang^{1,2}, TIAN Jiashen², WANG Zhaohui², MA Zhiqiang², HAN Jiabo^{2,*}, GAO Tianxiang¹

1 Institute of Evolution & Marine Biodiversity, Ocean University of China, Qingdao 266003, China

2 Liaoning Ocean and Fisheries Science Research Institute, Liaoning Province Key Laboratory of Marine Biological Resources and Ecology, Dalian 116023, China

Abstract: Stable isotope technique has been widely applied for identification of animal food sources and reconstruction of food chains and food webs in marine ecosystems, but it has been sparingly used in the research on feeding habits of marine mammals. Compared to the traditional stomach content analysis, which is lengthy, requires a large number of samples, and can only reflect the present state of the sampled organism, the stable isotope technique can reveal its extended biological activity, accurately measure biological source of nutrition, and truthfully identify the biological relationship among populations and the energy flow of the entire ecosystem. Various studies have applied the stable isotope method to investigate feeding in marine mammals such as pinnipeds, polar bears, and others. At present, research of finless porpoise has focused on morphology, behavior, age identification, population dynamics, etc. The previous diet studies mainly use the traditional methods to examine stomach content, whereas feeding studies of the finless porpoise in Liaodong Bay using stable isotopes

基金项目: 辽宁省海洋与渔业科研项目 (201417); 海洋公益性行业科研专项经费项目 (201105011)

收稿日期: 2014-07-07; **网络出版日期:** 2015-07-10

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jibhan@sina.com

have not been reported yet. Finless porpoise (genus *Neophocaena*) is a coastal, small-toothed cetacean inhabiting estuaries and rivers. It is broadly distributed in China, from the northern to the southern coastal areas and into the Yangtze River. The finless porpoise, which is listed as vulnerable in the IUCN list, includes *Neophocaena phocaenoides* and *Neophocaena asiaeorientalis*, with two subspecies (*Neophocaena asiaeorientalis* ssp. *asiaeorientalis* and *Neophocaena asiaeorientalis* ssp. *sunameri*) within the latter species. In the present study, we evaluated carbon and nitrogen stable isotope ratios in samples obtained from finless porpoises that were stranded and died on the coast of the Liaodong Bay and from those obtained from main fishing catches from the same area from April to June in 2012. We also evaluated the isotope ratio in the potential prey organisms. The mean values of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in samples of finless porpoise were $(-18.4 \pm 0.3)\text{‰}$ and $(13.8 \pm 0.4)\text{‰}$, respectively, whereas $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in samples of 28 kinds of potential prey organisms ranged from -19.5‰ to -17.0‰ and from 11.4‰ to 14.0‰ , respectively. The trophic level of finless porpoise was 4.5, which was higher than that obtained by traditional stomach content analysis. The trophic level of the 28 types of potential forages ranged from 3.8 to 4.6. Fish was the main prey of the finless porpoise; the contribution rate of prey organisms, from the biggest to the smallest, was as follows: pelagic fishes > mesodemersal fishes > demersal fishes > cephalopoda > shrimps > crabs, with the average contribution rate of 43.9%, 18.2%, 13.1%, 10.0%, 8.8%, and 6.0%, respectively. There was no significant linear correlation between the ratio of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ and the body length of finless porpoise; the carbon sources were stable and the nitrogen sources were complex. Overall, the application of stable isotope technique to study feeding habits in finless porpoise can improve our understanding of the biology of this species, and provide some essential information for its conservation.

Key Words: finless porpoise; carbon and nitrogen stable isotope; feeding habit; contribution proportion; Liaodong Bay

江豚 (genus *Neophocaena*) 有印度洋江豚 (*Neophocaena phocaenoides*) 和狭脊江豚 (*Neophocaena asiaeorientalis*) 两个种。江豚为小型齿鲸类, 属沿岸性、河口及江河性的豚类, 在中国的分布范围很广, 南北沿海地区及长江中下游均产。辽东湾水域的江豚属于狭脊江豚的亚种, 东亚江豚 (*N. a.* ssp. *sunameri*)^[1]。在 IUCN 名录中, 江豚被列为易危级, 长江江豚列为濒危级。

近年来, 随着稳定同位素技术被广泛应用于海洋生态系统的研究中, 为海洋生态学家研究海洋生物食性、食物网结构特征、生物之间的营养关系以及污染物示踪等问题提供了一条捷径^[2-5]。相比传统胃含物分析法需要样品数量大, 分析时间长, 且仅能反映生物体被采集时的瞬时状态的不足^[6]。稳定同位素技术具有可以反映生物长期的生命活动, 可对生物的营养来源进行准确测定, 并能准确定位生物种群间的相互关系及整个生态系统的能量流动的优势^[7]。在应用稳定同位素研究海洋哺乳动物食性中, 国外学者对鳍足类、北极熊等海洋哺乳动物的食性等研究中做了一些工作^[8-9]。目前关于江豚的研究主要集中在形态、行为、年龄鉴定、种群动态等方面^[10-13], 针对其食性的研究仅从传统胃含物分析法进行了初步研究^[13], 而应用稳定同位素对辽东湾水域江豚食性的研究尚未见报道。本研究应用此技术对其摄食食性进行研究, 不仅能完善江豚生物学研究内容, 更可为江豚的资源保护提供一定的基础资料。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与处理

江豚样品取自 2012 年 4 月—6 月在辽东湾沿岸海域搁浅而死亡的 7 头样本 (图 1)。生物资源样品取自 2012 年 6 月在辽东湾海域进行的底拖网调查 ($39^{\circ}30'\text{N}$ — $40^{\circ}55'\text{N}$, $120^{\circ}30'\text{E}$ — $122^{\circ}16'\text{E}$), 调查海域水深在 5m—30m。根据王丕烈^[13]采用胃含物法得出江豚食性和郝玉江等^[11]认为江豚只能吞食体形较小的食物, 本研究筛选出 28 种江豚可能的饵料生物 (每种选取体长相近样本至少 10 尾, 10 尾以下的全部取样), 并根据鱼类生活习性的不同, 分为底层鱼类、中下层鱼类和中上层鱼类^[14-15]。将江豚和饵料生物样本带入实验室后进行生物学特征测定, 江豚体长精确到 0.1cm, 体重精确到 0.1kg (XK3190-A6 型电子地磅秤)。饵料生物体长鱼

类为吻端至脊椎骨末端的长度,虾类为眼窝后缘至尾节末端的长度,蟹类为头胸甲两侧刺之间的距离,头足类为胴体背部中线的长度,精确到 0.1cm,体重精确到 0.1g(T1000Y 型电子天平)(表 1)。江豚和鱼类取背部肌肉,虾类取腹部肌肉,蟹类取第一鳌足肌肉,头足类取腕部肌肉。然后在冷冻干燥机(Christ Alpha 2-4 LD plus, 德国)中-80℃冻干,用玛瑙研钵充分磨匀以备稳定同位素分析。

1.2 碳氮稳定同位素测定

样品的稳定同位素分析在中国海洋大学分析测试中心进行。稳定同位素质谱仪为菲尼根 Flash EA1112 (美国)型元素分析仪和菲尼根 MAT 253 (美国)稳定同位素质谱仪相连而成测定¹⁵N、¹³C,稳定 C、N 同位素的自然丰度表示为:

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

式中, X 代表¹³C或¹⁵N。 R 代表¹³C/¹²C或¹⁵N/¹⁴N。 $\delta^{13}\text{C}$ 值是相对于 PDB 标准的自然丰度, $\delta^{15}\text{N}$ 值是相对空气中氮气的丰度^[16-18]。为保证结果准确性,同一样品的碳、氮稳定同位素分别进行测定。每个样品测定 3 个平行样,为保持实验结果的准确性和仪器的稳定性,每测定 5 个样品后插测 1 个标准样。碳、氮稳定同位素比值精密度为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

1.3 营养级的计算

在定好系统基线生物及氮营养富集度后,根据生物对基线生物氮稳定同位素比值的相对值,计算该生物的营养级,计算公式如下:

$$TL = \frac{\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}}{\Delta\delta^{15}\text{N}} + 2$$

式中,TL(trophic level)表示所计算生物的营养级, $\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}}$ 为该系统消费者氮同位素比值, $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 则为该系统基线生物的氮同位素比值, $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 为营养级的富集度。根据 Vender Zanden 等^[19]的建议,本研究采用初级消费者栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)闭壳肌的氮同位素比值(5.84‰)为氮稳定同位素基线值,营养级富集因子则同时采用 2.5‰和 3.8‰,为两者的平均值,其中 2.5‰来源于蔡德陵等^[20]在实验室控制饲养条件下所喂鳀与其饵料间的氮稳定同位素差值,3.8‰为万祎等^[21]测定渤海湾水生食物网氮稳定同位素的富集因子。

1.4 饵料贡献比例的计算

¹³C 在海洋动物营养级间的富集度低(0—1‰),多用于反映捕食者对饵料生物的吸收同化情况^[8]。根据所采集饵料生物类别及生活习性,将其划分成底层鱼类、中下层鱼类、中上层鱼类、蟹类、虾类和头足类 6 个组,采用 IsoSource 线性混合模型^[22]计算 6 组的饵料生物¹³C 对江豚的贡献比例。计算时按照指定的增量范围(increment)叠加运算出资源所有可能的百分比组合(和为 100%),每一个组合的加权平均值与混合物(消费者)实际测定的同位素值进行比较,对于给定忍受范围(tolerance)内($\pm 0.1\text{‰}$)的组合认定为可行解。在所有可行解中,对每种资源贡献百分比的出现频率进行分析,得到饵料生物的贡献比例。

$$\text{组合数量} = \left\{ \frac{(100 / i) + (s - 1)}{s - 1} \right\} = \frac{[(100 / i) + (s - 1)]!}{(100 / i)! (s - 1)!}$$

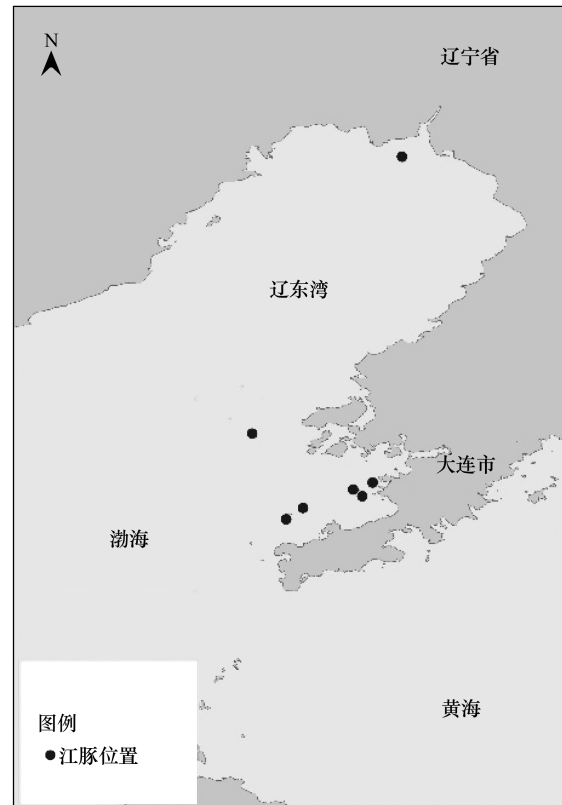


图 1 发现江豚位置图

Fig.1 Location of finless porpoises survey positions

1.5 数据处理

使用 SPSS 17.0 统计软件对数据进行分析处理, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 与体长相关性采用皮尔逊相关性分析法, 显著性相关设置 $P < 0.05$ 。尽管海洋甲壳动物口足目 (Hoplocarida) 和十足目 (Decapoda) 中的虾类在分类上关系较远, 但在沿海水体中, 这 2 类生物在栖息生境、营养级和资源数量变化上具有一定的相似性。因此, 本研究将口足目和十足目中的虾类合并统称为“游泳虾形类”(简称“虾类”)^[23-24]。测试结果以平均值 $\pm$ 标准差的形式表示。

2 结果

2.1 江豚及其可能生物饵料同位素比值

表 1 列出了江豚及其可能生物饵料的碳氮稳定同位素比值测试结果。江豚 $\delta^{13}\text{C}$ 均值为 $(-18.4 \pm 0.3)\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 均值为 $(13.8 \pm 0.4)\text{‰}$ 。辽东湾海域 28 种可能生物饵料的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值的范围为 -19.5‰ — -17.0‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 均值的范围为 11.4‰ — 14.0‰ 。其中, 底层鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值为 -18.1‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 均值为 13.1‰ ; 中下层鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值为 -18.3‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 均值为 12.7‰ ; 中上层鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值为 -19.0‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 均值为 12.5‰ ; 虾类的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值为 -17.6‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 均值为 12.1‰ ; 蟹类的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值为 -17.1‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 均值为 12.6‰ ; 头足类的 $\delta^{13}\text{C}$ 均值为 -17.8‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 均值为 11.8‰ 。

表 1 江豚及其可能饵料的碳氮稳定同位素比值 ($\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$)、营养级 (TL)、样本数及生物学测定结果

Table 1 Stable carbon and nitrogen isotope ratios of potential food sources to finless porpoise for Liaodong Bay

类别/种类 Category/Species	体长/cm Body Length	体重/Kg(g) Body Weight	样本数 Number of samples	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	TL
江豚 Finless porpoise	137.1 $\pm$ 19.7	37.4 $\pm$ 10.0	7	-18.4 $\pm$ 0.3	13.8 $\pm$ 0.4	4.5 $\pm$ 0.1
虾类 Shrimps						
鲜明鼓虾 <i>Alpheus heterocarpus</i>	7.0 $\pm$ 0.2	1.8 $\pm$ 0.5	12	-17.3 $\pm$ 0.1	11.6 $\pm$ 0.2	3.8 $\pm$ 0.1
中国对虾 <i>Fenneropenaeus chinensis</i>	16.5 $\pm$ 0.5	27.6 $\pm$ 1.8	14	-17.6 $\pm$ 0.2	11.6 $\pm$ 0.1	3.8 $\pm$ 0.1
日本鼓虾 <i>Alpheus japonicus</i>	5.8 $\pm$ 0.2	3.5 $\pm$ 0.5	10	-17.7 $\pm$ 0.1	12.1 $\pm$ 0.1	4.0 $\pm$ 0.1
脊腹褐虾 <i>Crangon affinis</i>	6.3 $\pm$ 0.2	2.4 $\pm$ 0.2	10	-17.5 $\pm$ 0.1	12.3 $\pm$ 0.1	4.1 $\pm$ 0.0
口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i>	10.2 $\pm$ 0.8	12.7 $\pm$ 0.9	14	-18.3 $\pm$ 0.1	12.7 $\pm$ 0.2	4.2 $\pm$ 0.2
蟹类 Crabs						
日本蟳 <i>Charybdis japonica</i>	7.1 $\pm$ 0.2	70.4 $\pm$ 1.9	10	-17.0 $\pm$ 0.2	12.9 $\pm$ 0.2	4.2 $\pm$ 0.2
三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i>	11.4 $\pm$ 0.5	63.4 $\pm$ 1.2	10	-17.3 $\pm$ 0.2	12.4 $\pm$ 0.1	4.1 $\pm$ 0.1
头足类 Cephalopoda						
长蛸 <i>Octopus variabilis</i>	11.2 $\pm$ 0.3	91.4 $\pm$ 2.1	10	-17.8 $\pm$ 0.2	12.3 $\pm$ 0.2	4.1 $\pm$ 0.1
短蛸 <i>Octopus ocellatus</i>	6.5 $\pm$ 0.3	34.9 $\pm$ 0.5	10	-18.0 $\pm$ 0.3	11.6 $\pm$ 0.3	3.8 $\pm$ 0.2
火枪乌贼 <i>Loligo beka</i>	6.3 $\pm$ 0.2	12.1 $\pm$ 0.4	12	-17.7 $\pm$ 0.1	11.4 $\pm$ 0.3	3.8 $\pm$ 0.1
鱼类 Fishes						
底层鱼类 Demersal fishes						
鲷 <i>Platycephalus indicus</i>	25.4 $\pm$ 1.4	88.5 $\pm$ 2.3	11	-18.2 $\pm$ 0.2	12.9 $\pm$ 0.3	4.3 $\pm$ 0.2
绵鳚 <i>Zoarces elongatus</i>	13.8 $\pm$ 0.2	11.1 $\pm$ 0.6	6	-18.2 $\pm$ 0.2	11.5 $\pm$ 0.3	3.8 $\pm$ 0.1
黄盖鲷 <i>Pseudopleuronectes</i>	13.7 $\pm$ 0.9	54.1 $\pm$ 1.8	6	-18.0 $\pm$ 0.2	12.6 $\pm$ 0.4	4.1 $\pm$ 0.1
焦氏舌鳎 <i>Cynoglossus joyneri</i>	13.1 $\pm$ 0.4	12.3 $\pm$ 1.0	16	-18.0 $\pm$ 0.1	12.9 $\pm$ 0.3	4.2 $\pm$ 0.2
矛尾鰕虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i>	11.0 $\pm$ 0.4	10.7 $\pm$ 0.5	13	-18.3 $\pm$ 0.1	13.1 $\pm$ 0.2	4.3 $\pm$ 0.1
黄鲛鰕 <i>Lophius litulon</i>	15.6 $\pm$ 1.5	143.2 $\pm$ 3.1	10	-17.9 $\pm$ 0.3	14.0 $\pm$ 0.2	4.6 $\pm$ 0.2
斑尾复鰕虎鱼 <i>Synechogobius ommaturus</i>	24.7 $\pm$ 0.8	79.2 $\pm$ 1.5	16	-18.3 $\pm$ 0.3	13.1 $\pm$ 0.3	4.3 $\pm$ 0.2
大泷六线鱼 <i>Hexagrammas otakii</i>	15.3 $\pm$ 1.0	46.5 $\pm$ 1.8	13	-17.9 $\pm$ 0.2	13.9 $\pm$ 0.2	4.5 $\pm$ 0.2
许氏平鲷 <i>Sebastes schlegeli</i>	15.1 $\pm$ 0.5	78.6 $\pm$ 2.1	12	-18.1 $\pm$ 0.1	13.6 $\pm$ 0.3	4.5 $\pm$ 0.1

续表						
类别/种类 Category/Species	体长/cm Body Length	体重/ Kg(g) Body Weight	样本数 Number of samples	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	TL
孔鲷 <i>Raja porosa</i>	16.5±0.7	43.7±2.6	6	-18.2±0.3	13.4±0.2	4.4±0.2
中下层鱼类 Meso-demersal fishes						
小黄鱼 <i>Larimichthys polyactis</i>	14.2±0.6	34.9±2.8	10	-18.3±0.2	12.8±0.3	4.2±0.1
皮氏叫姑鱼 <i>Johnius belengeri</i>	10.5±0.6	15.3±1.0	10	-18.7±0.2	11.7±0.2	3.9±0.1
假睛东方鲀 <i>Fugu pseudommus</i>	19.5±1.0	198.2±2.5	5	-18.2±0.1	13.3±0.4	4.4±0.2
条纹东方鲀 <i>Fugu xanthopterus</i>	15.1±1.4	103.2±1.7	4	-18.2±0.2	12.9±0.3	4.2±0.2
中上层鱼类 Pelagic fishes						
斑鲹 <i>Harengula zunasi</i>	12.8±0.4	26.7±0.7	10	-19.4±0.3	12.8±0.3	4.0±0.2
黄鲫 <i>Setipinna tenuifilis</i>	12.0±0.7	15.4±1.0	12	-19.0±0.0	13.0±0.2	4.0±0.1
鳀 <i>Engraulis japonicus</i>	13.4±2.1	10.6±0.1	14	-19.5±0.2	12.7±0.1	4.2±0.1
蓝点马鲛 <i>Scomberomorus niphonius</i>	14.6±1.1	22.1±1.4	6	-18.3±0.3	13.6±0.2	4.3±0.2

2.2 江豚及其可能生物饵料的营养级

表 1 列出了江豚及其 28 种可能生物饵料的营养级。从中可以看出,江豚的营养级为 4.5。28 种测试生物的营养级位于 3.8—4.6 之间。鱼类中,黄鮫鰭的营养级最高(4.6),绵鲷的营养级最低(3.8)。虾类中,口虾蛄的营养级最高(4.2±0.2),鲜明鼓虾和中国对虾的营养级最低(3.8)。蟹类中,日本蟳的营养级最高(4.2),三疣梭子蟹的营养级最低(4.1)。头足类中,长蛸的营养级最高(4.1),短蛸和火枪乌贼的营养级最低(3.8)。

2.3 江豚 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值与其体长的关系

通过图 2 对 7 头江豚样本分析看,江豚体长与肌肉 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值不存在显著相关性($p>0.05$)。

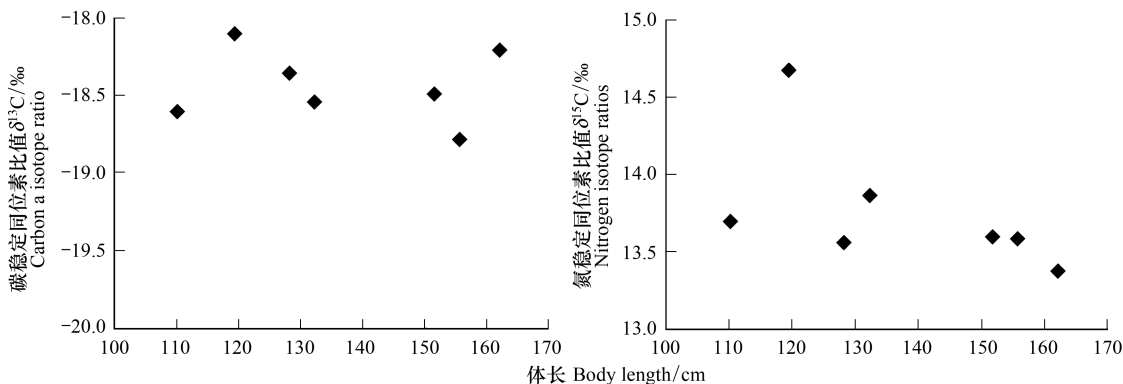


图 2 江豚 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值与其体长的关系
Fig.2 The relations among $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ and body length of finless porpoises

2.4 江豚的食物组成

根据捕食者的碳氮稳定同位素比值与其生境中所摄取食物的同位素组成相一致的原则^[25],结合江豚可能摄食生物饵料的碳氮同位素比值(见表 1)及胃含物分析法,判断江豚的可能生物饵料包含了本试验所分析的所有种类。

采用 IsoSource 软件计算得出不同类别生物饵料对江豚的贡献比例,由图 3 可知,江豚的主要食物来源为鱼类,其中,中上层鱼类平均贡献率为 43.9%,中下层鱼类平均贡献率为 18.2%,底层鱼类平均贡献率为 13.1%。其次为头足类平均贡献率为 10.0%,虾类平均贡献率为 8.8%,蟹类平均贡献率仅为 6.0%。

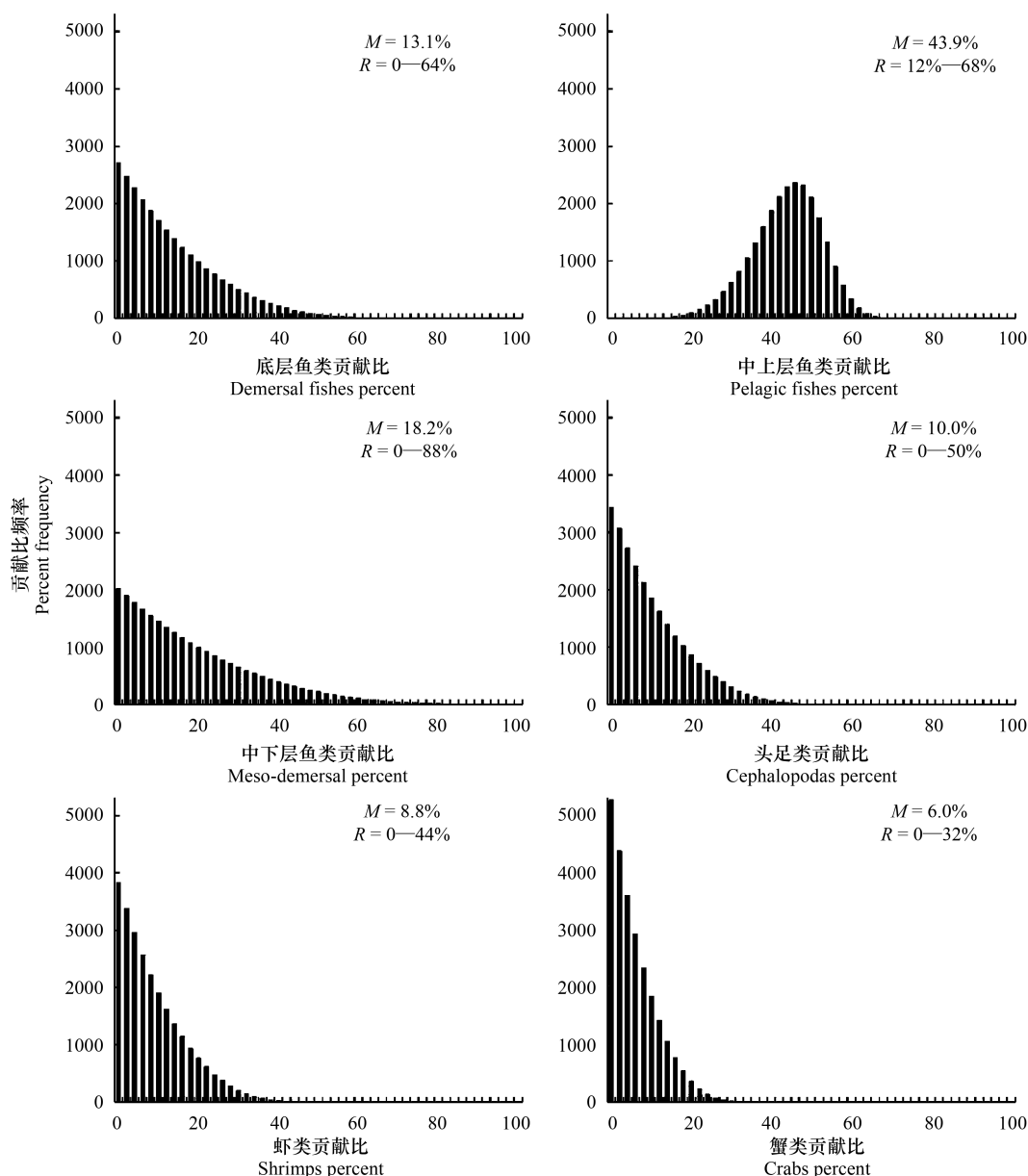


图3 不同类别生物饵料对江豚食物贡献比例频率图

Fig.3 The percent frequency of feasible contributions to finless porpoise food from different species of organism forages

M 为平均值, R 为变化范围

3 讨论

3.1 辽东湾海域生物的营养级

氮稳定同位素组成通常用于鉴别物种所处的营养级^[2,17]。Post 等^[25]认为不同营养级生物 $\delta^{15}\text{N}$ 值富集度以 3.4‰ 为标准。由于生物对不同食物有不同的消化吸收率,因此生物相对其食物存在不同的氮稳定同位素营养富集度,这使得从不同的生态系统和不同的实验对象得出的基线营养富集度可能不一样^[26]。所以许多研究者采用基线营养富集度的统计平均值 3.15‰ (2.5‰ 和 3.8‰ 的均值)^[6,25]。本研究中, $\delta^{15}\text{N}$ 值分布趋势由小到大依次为头足类、虾类、蟹类、中上层鱼类、中下层鱼类、底层鱼类和江豚。各类群间 $\delta^{15}\text{N}$ 比值的差值均小于 3.15‰ , 说明本研究中辽东湾海域生物类群的生态位重叠现象较为明显, 表现为不同类群往往摄食共同

的饵料生物,尤其是一些高营养级别种类往往摄取较低级饵料生物。

Jefferson 等^[27]和 Trites^[28]用胃含物分析法计算江豚的营养级分别为 4.0 和 4.08。本研究表明江豚的营养级为 4.5,高于传统胃含物分析方法得出的结果。将本研究的几种鱼类营养级与邓景耀等^[15]和孙明等^[6]对辽东湾及渤海海域鱼类营养级计算结果进行对比,发现绵鲯(2.4)、焦氏舌鳎(2.9)、大泷六线鱼(3.0)、小黄鱼(3.1)、皮氏叫姑鱼(3.3)和黄鲛鲷(3.5)的营养级高于邓景耀等^[15]的研究结果,而低于孙明等^[6]对皮氏叫姑鱼(4.5)、焦氏舌鳎(4.3)、小黄鱼(4.3)等的研究结果。万祎等^[21]采用氮稳定同位素法得出渤海湾绵鲯的营养级为 2.4,低于本研究的结果。彭士明等^[5]认为判定两者之间营养级位置是否一致,不能单纯比较所计算得出营养级的结果,因为影响营养级位置的因素较多,基线生物的选择以及一个营养级氮同位素富集度的界定标准均会导致营养级位置结果的差异。在孙明等^[6]的研究中,基线生物采用的是栉孔扇贝(5.84‰),营养富集因子则同时采用 2.5‰和 3.8‰的平均值。而万祎等^[21]将浮游动物的营养级定为 2,氮同位素富集因子采用 3.8‰。因此,基线生物的选择以及氮同位素富集度值的不同是造成研究结果不一致的主要原因。

3.2 江豚食性分析

海洋哺乳动物通常被认为是海洋生态系统中的最高捕食者,处于食物网的顶层,如虎鲸(4.23)、北极熊(4.80)以其他海洋哺乳动物为食,是真正的食肉动物。也有一些海洋哺乳动物如海牛和儒艮(2.0)以食物网底层的浮游动植物为食,它们处于较低的营养层。因此,海洋哺乳动物跨越五分之四的营养层。Trite 的研究表明许多种鱼类与虎鲸和北极熊等海洋哺乳动物处于同一营养层甚至在其之上^[28]。Cherel 等^[8]在 Kerguelen Islands 水域通过稳定同位素法对南象海豹的食性研究中发现,虽然南象海豹(4.6)并不处于 Kerguelen Islands 水域营养层的顶层,但其摄食大王乌贼(*Mesonychoteuthis hamiltoni*)(6.1)和巴塔哥尼亚齿鱼(*Dissostichus eleginoides*)(5.0)等高于自身营养级的生物,与本研究江豚摄食黄鲛鲷、大泷六线鱼、许氏平鲈等生物的结论一致。

通过胃含物分析法许多学者对江豚食性做了研究,Pauly 等^[29]发现江豚食物组成中鱼类占 50%,小型鱿鱼占 40%,底栖无脊椎动物占 10%。王丕烈^[13]认为江豚食性以鱼类为主,同时也食虾类和头足类,其胃含物主为青鳞鱼(*Harengula zunasi*)、梭鱼(*Mugil soiuy*)、皮氏叫姑鱼、小黄鱼、斑鲷等中上层鱼类。本研究得出江豚食物组成中鱼类占 75.2%,并且中上层鱼类占 43.9%,与他们的研究结果相符。郝玉江等^[11]认为江豚捕食鱼的种类主要受不同区域鱼类资源的影响,但是由于江豚只能整个吞食猎物,所以江豚主要选择体形较小的食物,在人工饲养环境一般选择体重 100—300g 的小鱼饲喂。黄鲛鲷、蓝点马鲛和孔鳐属于较大型鱼类,在自然水域中其成熟个体的体长和体重超出了江豚的摄食能力,而本研究中所测试的该 3 种鱼类,其体长和体重范围均属于小型个体,在江豚的摄食能力范围之内。

3.3 不同体长江豚同位素关系

有研究表明,很多情况下,整个生长过程中鱼类食性不是保持不变,会随着年龄及生长阶段不同改变^[30]。陈银瑞等^[31]研究发现,当红鳍原鲂体长小于 100mm 时,主要摄食枝角类;体长 100—130mm 时,主要摄食枝角类和虾类;体长大于 130 时,主要食物为虾类。一般来说,这种食性转变与鱼类捕食能力增强有关。

本研究中,7 头江豚碳氮稳定同位素比值与体长无明显的线性关系,可能是因为所采集样品有限,对这种显著性的线性关系是否存在还有待进一步分析。站位间江豚稳定同位素比值随体长变异程度较大,说明江豚对食物的选择性与体长关系不显著,摄食种类与数量是由环境中饵料多寡和可获得程度决定。7 头江豚 $\delta^{13}\text{C}$ 值在所取体长范围内变化不大,最大值与最小值相差 0.72‰,而不同体长江豚 $\delta^{15}\text{N}$ 值相差较大,最大差值为 1.30‰,说明系统中江豚碳营养源较为稳定,氮营养源复杂多变^[7]。

参考文献 (References):

- [1] Jefferson T A, Wang J Y. Revision of the taxonomy of finless porpoises (genus *Neophocaena*): The existence of two species. *Journal of Marine Animals and Their Ecology*, 2011, 4(1): 3-16.
- [2] Hansson S, Hobbie J E, Elmgren R, Larsson U, Fry B, Johansson S. The stable nitrogen isotope ratio as a marker of food-web interactions and fish

- migration. *Ecology*, 1997, 78(7): 2249-2257.
- [3] Kang C K, Choy E J, Son Y, Lee J Y, Kim J K, Kim Y, Lee K S. Food web structure of a restored macroalgal bed in the eastern Korean Peninsula determined by C and N stable isotope analyses. *Marine Biology*, 2008, 153(6): 1181-1198.
- [4] 李忠义, 金显仕, 庄志猛, 唐启升, 苏永全. 稳定同位素技术在水域生态系统研究中的应用. *生态学报*, 2005, 25(11): 3052-3060.
- [5] 彭士明, 施兆鸿, 尹飞, 孙鹏, 王建钢. 利用碳氮稳定同位素技术分析东海银鲳食性. *生态学杂志*, 2011, 30(7): 1565-1569.
- [6] 孙明, 刘修泽, 李轶平, 董婧. 应用氮稳定同位素技术研究辽东湾海域主要渔业生物的营养级. *中国水产科学*, 2013, 20(1): 189-197.
- [7] 李忠义, 郭旭鹏, 金显仕, 庄志猛, 苏永全, 张凤琴. 长江口及其邻近水域春季虹鲌的食性. *水产学报*, 2006, 30(5): 654-661.
- [8] Cherel Y, Ducatez S, Fontaine C, Richard P, Guinet C. Stable isotopes reveal the trophic position and mesopelagic fish diet of female southern elephant seals breeding on the Kerguelen Islands. *Marine Ecology Progress Series*, 2008, 370: 239-247.
- [9] Hall-Aspland S A, Rogers T L, Canfield R B. Stable carbon and nitrogen isotope analysis reveals seasonal variation in the diet of leopard seals. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 305: 249-259.
- [10] 陈嘉绩. 江豚肝内门静脉系的初步观察. *兽类学报*, 2004, 24(1): 88-89.
- [11] 郝玉江, 王克雄, 韩家波, 郑劲松, 先义杰, 姚志平, 鹿志创, 李海燕, 张先锋. 中国海兽研究概述. *兽类学报*, 2011, 31(1): 20-36.
- [12] 张先锋. 江豚的年龄鉴定、生长和生殖的研究. *水生生物学报*, 1992, 16(4): 289-298.
- [13] 王丕烈. 中国鲸类. 北京: 化学工业出版社, 2012: 361-376.
- [14] 姜大为. 中国北方海水鱼及海兽彩色图集. 沈阳: 辽宁人民出版社, 2001.
- [15] 邓景耀, 孟田湘, 任胜民. 渤海鱼类食物关系的初步研究. *生态学报*, 1986, 6(4): 356-364.
- [16] Craig H. Isotopic standards for carbon and oxygen and correction factors for mass-spectrometric analysis of carbon dioxide. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1957, 12(1/2): 133-149.
- [17] Peterson B J, Fry B. Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1987, 18(1): 293-320.
- [18] Mariotti A. Atmospheric nitrogen is a reliable standard for natural ^{15}N abundance measurements. *Nature*, 1983, 303(5919): 685-687.
- [19] Vender Zanden M J, Rasmussen J B. Variation in the $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ trophic fractionation: Implications for aquatic food web studies. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46(8): 2061-2066.
- [20] 蔡德陵, 李红燕, 唐启升, 孙耀. 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. *中国科学 C 辑: 生命科学*, 2005, 35(2): 123-130.
- [21] 万祎, 胡建英, 安立会, 安伟, 杨敏, 伊藤光明, 服部达也, 陶澍. 利用稳定氮和碳同位素分析渤海湾食物网主要生物的营养层次. *科学通报*, 2005, 50(7): 708-712.
- [22] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources. *Oecologia*, 2003, 136(2): 261-269.
- [23] 徐兆礼, 沈益绿, 李新正. 瓠江口海域夏、秋季口足目和十足目虾类分布特征. *中国水产科学*, 2009, 16(1): 104-112.
- [24] 赵蒙蒙, 徐兆礼. 三门湾海域冬夏季口足目和十足目虾类的种类组成、时空分布及多样性分析. *动物学杂志*, 2011, 46(3): 11-18.
- [25] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions. *Ecology*, 2002, 83(3): 703-718.
- [26] France R L, Peters R H. Ecosystem differences in the trophic enrichment of ^{13}C in aquatic food webs. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1997, 54(6): 1255-1258.
- [27] Jefferson T A, Leatherwood S, Webber M A. *Marine Mammals of the World*. Rome: FAO Species Identification Guide. Food and Agriculture Organization, 1993: 1-320.
- [28] Trites A W. Marine mammal trophic levels and interaction. *Encyclopedia of Ocean Sciences*, 2001: 1628-1633, doi: 10.1006/rwos.2001.0441.
- [29] Pauly D, Trites A W, Capuli E, Christensen V. Diet composition and trophic levels of marine mammals. *ICES Journal of Marine Science*, 1998, 55(3): 467-481.
- [30] 周德勇. 太湖梅梁湾梅鲢的食性研究: 胃含物和稳定同位素分析[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- [31] 陈银瑞, 杨君兴, 周伟, 崔桂华, 匡溥人, 王勇, 王瑛, 王聪. 滇池红鳍原鲃生物学及对太湖新银鱼渔业的影响. *动物学研究*, 1994, 15(S1): 88-95.