

## 华南典型海湾主要渔业生物碳氮稳定同位素研究

张文博<sup>1,2</sup>, 黄洪辉<sup>2</sup>, 李纯厚<sup>2</sup>, 刘永<sup>2</sup>, 齐占会<sup>2</sup>, 徐姗楠<sup>2</sup>, 刘华雪<sup>3</sup>

(1. 广东省环境科学研究院, 广东广州 510045; 2. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东广州 510300;  
3. 生态环境部华南环境科学研究所, 广东广州 510530)

**摘要:** 为了解生境差异显著的华南典型海湾主要渔业生物的营养结构特征, 于 2015 年丰水期研究了海陵湾和陵水湾主要渔业生物碳、氮稳定同位素比值 ( $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$ ), 并计算了基于  $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$  量化的营养结构。结果表明, 海陵湾主要渔业生物的  $\delta^{13}\text{C}$  [ $(-15.36\pm 0.62)\text{‰}$ ] 和  $\delta^{15}\text{N}$  [ $(15.53\pm 0.94)\text{‰}$ ] 均显著高于陵水湾 ( $P<0.01$ ), 但  $\delta^{13}\text{C}$  差值 (CR) 和  $\delta^{15}\text{N}$  差值 (NR) 低于陵水湾。陵水湾渔业生物 NR 和总面积 (TA) 都高于海陵湾, 表明陵水湾比海陵湾食物链更长, 多样性水平更高。以 3.4‰ 作为一个营养级的氮稳定同位素富集度来计算, 陵水湾渔业生物营养级级距仅为 1.37, 而海陵湾主要渔业生物营养级级距小于 1, 说明陵水湾和海陵湾均处于高营养级生物较少且食物网受干扰较多的状态。

**关键词:** 稳定同位素; 渔业生物; 海陵湾; 陵水湾

中图分类号: S 913

文献标志码: A

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



## Study on carbon and nitrogen stable isotopes of main fishery species in typical gulf, southern China

ZHANG Wenbo<sup>1,2</sup>, HUANG Honghui<sup>2</sup>, LI Chunhou<sup>2</sup>, LIU Yong<sup>2</sup>, QI Zhanhui<sup>2</sup>, XU Shannan<sup>2</sup>, LIU Huaxue<sup>3</sup>

(1. Guangdong Provincial Academy of Environmental Sciences, Guangzhou 510045, China; 2. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China; 3. South China Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Guangzhou 510530, China)

**Abstract:** In order to understand the characteristics of trophic structure of main fishery in typical gulf of southern China with significant habitat difference, we analyzed the ratio of carbon and nitrogen stable isotopes ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$ ) of major fishery species collected in Hailing Bay and Lingshui Bay in wet season of 2015, and calculated several quantitative metrics based on the  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  ratios so as to quantitatively characterize the trophic structure in community-wide aspect. The results show that the average  $\delta^{13}\text{C}$  [ $(-15.36\pm 0.62)\text{‰}$ ] and  $\delta^{15}\text{N}$  [ $(15.53\pm 0.94)\text{‰}$ ] values of main fishery species in Hailing Bay were significantly higher than those in Lingshui Bay [ $(-17.44\pm 1.21)\text{‰}$  and  $(13.78\pm 1.31)\text{‰}$ ,  $P<0.01$ ]. However, the NR and TA values of Hailing Bay were lower than those of Lingshui Bay, showing longer food chain length and higher diversity in Lingshui Bay. Calculated by 3.4‰ as a nutrient grade of nitrogen stabilized isotope enrichment, the grade distance of Lingshui Bay fishery was only 1.37, lower than 1 of Hailing Bay, indicating that both Lingshui Bay and Hailing Bay have relatively less high trophic organisms and the food webs are often disturbed.

收稿日期: 2018-07-31; 修回日期: 2019-06-17

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0900904); 国家自然科学基金项目 (41706138); 广东省渔业生态环境重点实验室开放基金资助项目 (FEEL-2017-7)

作者简介: 张文博 (1991—), 男, 硕士, 从事海洋生态学研究。E-mail: wenbozhang91@163.com

通信作者: 刘华雪 (1984—), 男, 博士, 副研究员, 从事海洋生态学研究。E-mail: liuhuaxue@scies.org

**Key words:** stable isotope; fishery species; Hailing Bay; Lingshui Bay

海湾是陆地与海域相接的半封闭海域,受陆地和人类活动影响显著,随着近年来海水养殖、海洋工程和滨海旅游等行业的发展以及城镇化的快速推进,海湾生态环境发生了显著变化<sup>[1-4]</sup>。海湾食物网结构随着生态环境的变化产生了哪些改变,其主要渔业生物营养级如何变化,尚了解不多,尤其是华南海域。华南海域生境类型多样,地形地貌、经济发展水平和海域生态环境状况差别显著。海陵湾和陵水湾是华南地区的两个重要海湾,分别位于广东西部和海南南部。近年来两个海湾的海水水质<sup>[5]</sup>、沉积物<sup>[6]</sup>和浮游生物<sup>[7]</sup>等均发生了显著变化,但关于这2个海湾食物网营养结构特征的研究仍十分欠缺,仅见于海南新村湾海草床中主要鱼类及大型无脊椎动物食物来源的研究<sup>[8]</sup>。

在食物网研究中,稳定同位素技术的使用日益普遍,根据加拿大342种鱼的营养级分析结果<sup>[9]</sup>,发现稳定同位素法得出的结果与胃含物分析法无显著差异,证明了用稳定同位素技术研究鱼类营养级的可靠性。由于碳稳定同位素比值在捕食者和食物间变化很小,平均富集0~1‰,故可用于区分食物来源和贡献量<sup>[10]</sup>;氮稳定同位素比值在捕食者和食物间通常能富集3‰左右,可用来确定生物在食物网中的营养位置<sup>[11-12]</sup>。在长江口和南黄海春季拖网渔获物营养级的研究<sup>[13]</sup>中发现,生物资源种类的营养级存在空间和生物种类差异,显示出渔业生物营养级对生境差异的响应。华南典型海域主要渔业生物营养级对生境差异有哪些响应特征,有待进一步了解。本研究应用稳定同位素技术分析了华南典

型海湾主要渔业生物的碳、氮稳定同位素组成和营养结构,以期能了解渔业资源群落结构和食物网对生态环境变化的响应,为科学认知人类活动影响下的海湾生态系统演化规律提供基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 样品采集

2个海湾的定点底拖网调查站位见图1。拖网船均系当地渔民渔船,网口高4 m、宽5 m,网囊网目3 cm×3 cm。所有渔获样品均进行现场低温冷冻保存。带回实验室后随机选取主要的渔业生物进行取样分析。

### 1.2 样品处理与分析

**1.2.1 环境样品** 现场使用5 L有机玻璃采水器采集水样,温度和盐度由YSI(556 MPS)多参数水质测量仪测得。营养盐分析均参照Liu等<sup>[14]</sup>的方法,使用Lachat QC8500流动注射比色法测定营养盐。

**1.2.2 生物样品** 鱼类样品取其背部白色肌肉,蟹类去壳取第一螯足肌肉,头足类取胴体肌肉。所有样品经冷冻干燥48 h后,研磨过筛(80目),最后置于干燥器中保存。

所有样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 均在中国科学院水生生物研究所分析完成。样品的稳定同位素分析仪器为Finnigan delta plus和Flash EA1112联用仪,为了保证测试结果的准确性,每测试10个样品后加测一个标准样,并且对个别样品进行2~3次的复测,样品 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 分析精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

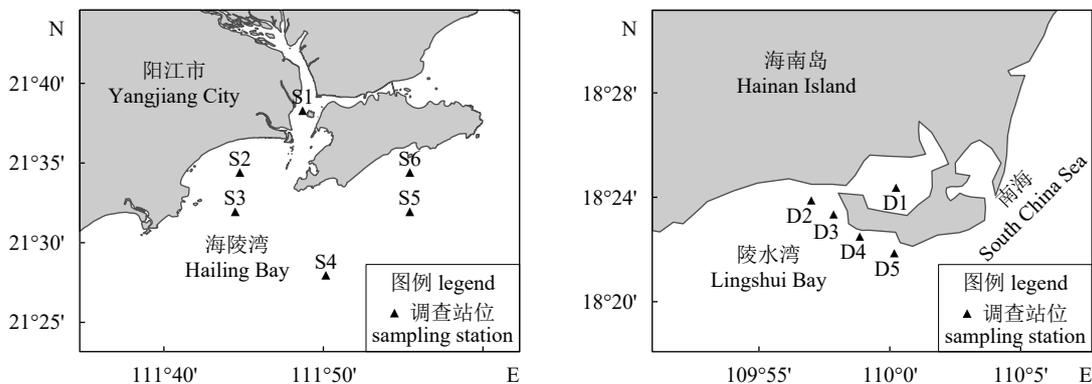


图1 海陵湾和陵水湾采样站点图

Fig.1 Sampling stations of Hailing Bay and Lingshui Bay

碳、氮稳定同位素值计算公式:

$$\delta = [(R_{\text{sample}}/R_{\text{standard}}) - 1] \times 1000$$

式中  $\delta$  代表碳、氮同位素 ( $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$ );  $R_{\text{sample}}$  表示所测样品的同位素比值 ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  或  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ );  $R_{\text{standard}}$  是国际上通用的标准物的重轻同位素丰度之比, 碳稳定同位素标准物为美洲拟箭石 (PDB), 氮稳定同位素标准物为大气氮。

### 1.3 数据分析

根据 Layman 等<sup>[15]</sup> 提出的构建  $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$  二维坐标系来代表群落的营养生态位, 本文选取 6 种度量参数:  $\delta^{15}\text{N}$  差值 (NR), 表示营养层次和多样性水平;  $\delta^{13}\text{C}$  差值 (CR) 表示摄食来源多样性水平; 总面积 (TA), 表示食物网中营养多样性的总程度; 平均离心距离 (CD), 表示食物网中营养多样性平均水平; 平均最邻近距离 (NND), 表示群落的整体密度; 平均最邻近距离标准差 (SDNND), 表示营养生态位分布范围水平。在这 6 种参数中, 前 4 种参数 (NR、CR、TA 和 CD) 用来反映营养结构多样性, 后 2 种参数 (NND 和 SDNND) 用来研究营养冗余度。参数数值通过 MATLAB 软件进行计算。

## 2 结果

### 2.1 环境特征

海陵湾水环境要素主要由丰头河的陆源冲淡水及外海水控制, 其夏季平均水温略高于陵水湾 (表 1), 但盐度低于陵水湾。陵水湾与新村港相通, 因此其水环境质量既受南海海水影响, 又受新村港影响。近年来, 由于陵水湾新村港内养殖面积激增, 养殖污水、船坞废水及生活污水的大量排放, 致海域内水质变差。陵水湾总溶解无机氮平均浓度是海陵湾

表1 海陵湾和陵水湾海水环境参数特征

Tab.1 Characteristics of environmental parameters of

Hailing Bay and Lingshui Bay

$\bar{x} \pm \text{SD}$

参数 parameter	海陵湾 Hailing Bay	陵水湾 Lingshui Bay
水温/ $^{\circ}\text{C}$ temperature	29.71 $\pm$ 1.20	29.61 $\pm$ 0.83
盐度 salinity	34.53 $\pm$ 1.06	35.37 $\pm$ 0.29
溶解无机磷/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ dissolved inorganic phosphorus	0.005 $\pm$ 0.001	0.016 $\pm$ 0.006
溶解无机氮/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ dissolved inorganic nitrogen	0.023 $\pm$ 0.009	0.153 $\pm$ 0.077

的 6 倍多, 而溶解无机磷平均浓度也是海陵湾的 3 倍多。

### 2.2 渔业生物碳氮稳定同位素值

海陵湾共分析了 14 种渔业生物的稳定同位素值 (表 2), 其中鱼类 12 种、蟹类 2 种。 $\delta^{13}\text{C}$  介于  $-16.41\text{‰}$ ~ $-13.97\text{‰}$ , 均值为  $(-15.36 \pm 0.62)\text{‰}$ , 其中丽叶鲷 (*Alepes djedaba*) 的  $\delta^{13}\text{C}$  最低, 少鳞鳕 (*Sillago japonica*) 的  $\delta^{13}\text{C}$  最高;  $\delta^{15}\text{N}$  变化从短尾小沙丁 (*Sardinella sindensis*) 的 12.94‰ 到多齿蛇鲻 (*Saurida tumbil*) 的 16.7‰, 均值为  $(15.53 \pm 0.94)\text{‰}$ 。

陵水湾共分析了 15 种渔业生物的稳定同位素值 (表 3), 其中鱼类 11 种、蟹类 2 种和头足类 2 种。 $\delta^{13}\text{C}$  介于  $-19.8\text{‰}$ ~ $-15.35\text{‰}$ , 均值为  $(-17.44 \pm 1.21)\text{‰}$ , 其中黄斑篮子鱼 (*Siganus canaliculatus*) 的  $\delta^{13}\text{C}$  最低, 锈斑蜆 (*Charybdis feriatus*) 的  $\delta^{13}\text{C}$  最高;  $\delta^{15}\text{N}$  介于 10.91‰~15.57‰, 均值为  $(13.78 \pm 1.31)\text{‰}$ , 其中带鱼 (*Trichiurus lepturus*) 拥有最高的  $\delta^{15}\text{N}$ 。

### 2.3 营养结构

基于  $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$  的双位图, 并根据双位图计算出基于稳定同位素量化的营养结构的群落范围指标 (表 4)。结果表明 2 个海湾的食物链长度和食物来源广泛度均不高。

海陵湾 CR 和 NR 分别为 2.44 和 3.06, TA 约为 5.1, CD 为 0.93, 显示出海陵湾主要渔业生物营养结构多样性较低。NND 和 SDNND 分别为 0.55 和 0.35, 表明海陵湾食物网营养冗余较高 (图 2)。

陵水湾的 CR 和 NR 分别为 4.45 和 4.66, TA 约为 11.18, CD 为 1.49, 显示出陵水湾营养结构多样性较低, 但好于海陵湾。NND 和 SDNND 分别为 0.60 和 0.54, 表明陵水湾食物网营养冗余较高, 但冗余程度低于海陵湾 (图 3)。

与海州湾和南海西南陆架区相比, 海陵湾和陵水湾均呈现出食物链长度不足的特征, TA、CD、NND、SDNND 均相差不大, 处于较低水平, 说明这些海湾和近海区域均存在食物链长度不足、捕捞压力大、食物网营养结构冗余的现象 (表 4)。

## 3 讨论

### 3.1 生态环境差异和人类活动对渔业生物碳氮同位素的影响

浮游生物等基础饵料生物  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  的变

表2 海陵湾主要渔业生物的稳定同位素比值 ( $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ ) 和取样体长 ( $L$ )Tab.2 Stable isotope signature ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$ ) and length ( $L$ ) for major fishery species in Hailing Bay

种 species	碳稳定同位素/‰ $\delta^{13}\text{C}$	氮稳定同位素/‰ $\delta^{15}\text{N}$	长度 ( $L$ )/mm length
多齿蛇鲻 <i>Saurida tumbil</i>	-15.35	16.70	45~278
丽叶鲆 <i>Alepes djedaba</i>	-16.41	15.90	74~90
平鲷 <i>Rhabdosargus sarba</i>	-15.50	15.58	95~115
细鳞鲷 <i>Terapon jarbua</i>	-15.92	16.09	51~120
汉氏棱鯧 <i>Thryssa hamiltonii</i>	-15.61	16.19	89~157
六指马鲛 <i>Polydactylus sextarius</i>	-15.02	16.17	120~127
长棘鲷 <i>Leiognathus fasciatus</i>	-14.78	15.73	58~85
少鳞鳢 <i>Sillago japonica</i>	-13.97	16.48	111~140
南方鲷 <i>Callionymus meridionalis</i>	-15.32	15.29	82~98
斑头舌鲷 <i>Cynoglossus puncticeps</i>	-15.73	15.97	92~123
短尾小沙丁 <i>Sardinella sindensis</i>	-15.52	15.23	106~115
黄斑篮子鱼 <i>Siganus canaliculatus</i>	-16.12	13.71	98~146
远海梭子蟹 <i>Portunus pelagicus</i>	-14.96	13.635	13~70
红星梭子蟹 <i>Portunus sanguinolentus</i>	-14.82	14.69	26~59
范围/‰ range	-16.41~-13.97	12.94~16.7	-
平均值/‰ $\bar{X} \pm \text{SD}$	-15.36 $\pm$ 0.62	15.53 $\pm$ 0.94	-

表3 陵水湾主要渔业生物的稳定同位素比值 ( $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$ ) 和取样体长 ( $L$ )Tab.3 Stable isotope signature ( $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$ ) and length ( $L$ ) for major fishery species in Lingshui Bay

种类 species	碳稳定同位素/‰ $\delta^{13}\text{C}$	氮稳定同位素/‰ $\delta^{15}\text{N}$	长度 ( $L$ )/mm length
多齿蛇鲻 <i>Saurida tumbil</i>	-17.44	14.63	113~215
二长棘犁齿鲷 <i>Eynnys cardinalis</i>	-17.20	14.77	72~189
短尾大眼鲷 <i>Priacanthus macracanthus</i>	-18.15	10.91	70~84
长尾大眼鲷 <i>Priacanthus tayenus</i>	-16.80	14.29	132~134
竹筴鱼 <i>Trachurus japonicus</i>	-18.15	13.54	110~159
花斑蛇鲻 <i>Saurida undosquamis</i>	-18.09	13.18	49~121
日本鳗鲡 <i>Anguillidae japonica</i>	-15.60	15.14	280~322
篮圆鲹 <i>Decapterus maruadsi</i>	-18.44	13.97	103~169
黄斑篮子鱼 <i>Siganus canaliculatus</i>	-19.80	11.41	167~176
刺鲷 <i>Psenopsis anomala</i>	-18.24	14.00	130~145
带鱼 <i>Trichiurus lepturus</i>	-17.30	15.57	118~212
看守长眼蟹 <i>Podophthalmus vigil</i>	-15.96	12.74	40~53
锈斑蜆 <i>Charybdis feriatus</i>	-15.35	15.07	51~80
杜氏枪乌贼 <i>Loligo duvauceli</i>	-18.31	13.74	30~200
日本无针乌贼 <i>Sepiella japonica</i>	-16.73	13.78	34~222
范围/‰ range	-19.8~-15.35	10.91~15.57	-
平均值/‰ $\bar{X} \pm \text{SD}$	-17.44 $\pm$ 1.21	13.78 $\pm$ 1.31	-

表4 典型海域食物网营养结构

Tab.4 Trophic structure of food web in typical sea areas

区域 area	年份 year	总面积 TA	平均离心距离 CD	平均最邻近距离 NND	平均最邻近距 离标准差 SDNND	$\delta^{13}\text{C}$ 差值 CR	$\delta^{15}\text{N}$ 差值 NR
海陵湾 Hailing Bay	2015	5.10	0.93	0.55	0.35	2.44	3.06
陵水湾 Lingshui Bay	2015	11.18	1.49	0.60	0.54	4.45	4.66
海州湾 <sup>[16]</sup> Haizhou Bay	2014	13.00	1.37	0.61	0.64	3.70	6.40
海州湾 <sup>[16]</sup> Haizhou Bay	2015	7.15	1.36	0.42	0.24	1.70	6.04
南海西南陆架区 <sup>[17]</sup> southwestern continental shelf of South China Sea	2013	5.8	1.0	0.37	0.43	3.4	4.3

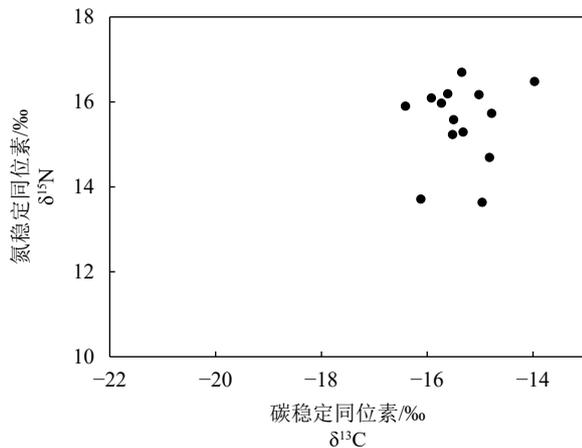


图2 海陵湾主要生物种类的碳、氮稳定同位素比值  
Fig.2  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values of major species in Hailing Bay

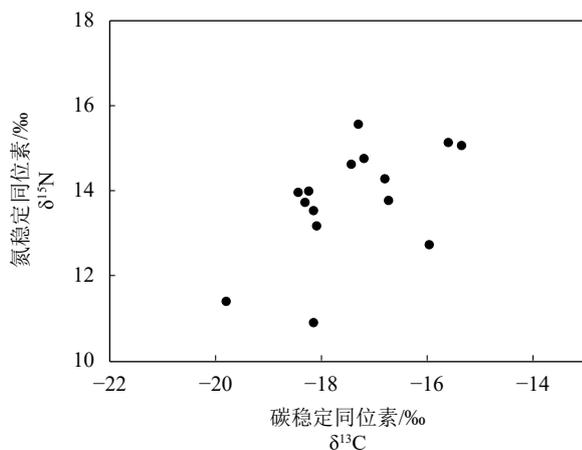


图3 陵水湾主要生物种类的碳、氮稳定同位素比值  
Fig.3  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values of major species in Lingshui Bay

化, 通过捕食者的摄食影响到鱼类, 进而传递到整个食物网<sup>[18]</sup>。许思思等<sup>[19]</sup>分析了近 50 年来渤海捕捞渔获物资源结构的变化特征及影响因素, 指出营

养盐的变化会改变浮游植物的群落结构, 导致渔业资源结构的改变。陵水湾渔业生物 CR 高于海陵湾, 可能与陵水湾物质输入导致渔业生物食物来源更广泛有关。陵水湾内存在大量的水产养殖, 陆源输入营养物质也较多<sup>[20]</sup>, 因此陵水湾渔业生物的 CR 高于海陵湾, 但整体 CR 均不高。

陵水湾渔业生物 NR 值和 TA 值都高于海陵湾, 显示陵水湾较海陵湾食物链更长, 多样性水平更高。以 3.4‰作为一个营养级的氮稳定同位素富集度来计算, 陵水湾渔业生物营养级级距仅为 1.37, 而海陵湾主要渔业生物营养级级距小于 1, 说明陵水湾和海陵湾均处于高营养级生物较少、食物网受干扰较多(捕捞活动造成高营养级生物损失)的状态。

### 3.2 主要渔业生物不同发育阶段碳氮稳定同位素值变化

渔业生物随着个体生长, 食性会发生变化, 渔业生物可选择和利用的食物来源更多样; 摄食会趋向于高营养层次的生物, 从而改变其营养级, 占据更多的营养层次<sup>[21-24]</sup>, 如南海鳶乌贼 (*Syngnathus ocellatus*)  $\delta^{15}\text{N}$  随胴长增加变化显著, 呈指数增长<sup>[25]</sup>。本研究中, 主要渔业生物在不同发育阶段  $\delta^{15}\text{N}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  发生变化。以陵水湾多齿蛇鲭和日本无针乌贼 (*Sepiella japonica*) 为例, 由于取样体长有较大差异,  $\delta^{15}\text{N}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  均随体长增加而增大, 其中多齿蛇鲭和日本无针乌贼  $\delta^{15}\text{N}$  分别变化了 1.42‰和 2.78‰。以 3.4‰作为一个营养级的氮稳定同位素富集度来计算<sup>[11]</sup>, 多齿蛇鲭和日本无针乌贼的营养级分别变化了 0.42 和 0.82; 而

$\delta^{13}\text{C}$  分别变化了 0.19‰ 和 0.86‰, 表明随着多齿蛇鲻和日本无针乌贼的生长发育, 其食物来源发生了改变。由此可见, 陵水湾主要渔业生物在不同发育阶段食性发生变化, 营养级亦随之变化。

#### 4 结论

海陵湾主要渔业生物的  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  均显著高于陵水湾, 但 CR 和 NR 低于陵水湾。陵水湾渔业生物 NR 和 TA 均高于海陵湾, 表明陵水湾较海陵湾食物链更长, 多样性水平较高。陵水湾渔业生物营养级级距仅为 1.37, 而海陵湾营养级级距小于 1, 说明陵水湾和海陵湾均处于高营养级生物较少、食物网受干扰较多的状态。

#### 参考文献:

- [1] 丘耀文, 朱良生, 徐梅春, 等. 海陵湾水环境要素特征 [J]. 海洋科学, 2006, 30(4): 20-24.
- [2] LIU S, CHEN H, ZHOU G J, et al. Occurrence, source analysis and risk assessment of androgens, glucocorticoids and progestagens in the Hailing Bay region, South China Sea[J]. Sci Total Environ, 2015, 536: 99-107.
- [3] 潘英姿, 宋福, 高吉喜, 等. 海南省近岸海域水生生态污染研究 [J]. 环境科学研究, 2007, 20(1): 58-63.
- [4] 龚玉艳, 肖雅元, 徐姗楠, 等. 陵水湾浮游动物群落结构特征及其季节变化 [J]. 中国水产科学, 2019, 26(1): 71-81.
- [5] 李婷, 朱长波, 李俊伟, 等. 海陵湾口海水水质的综合分析与评价 [J]. 南方水产科学, 2018, 14(3): 49-57.
- [6] QIU Y W, ZHU L S, LI M Q. Distribution characteristics of heavy metals and grain size of sediments from Hailing Bay, China[J]. Mar Pollut Bull, 2005, 7(1): 69-76.
- [7] 王晓敏, 江涛, 吕淑果, 等. 海南陵水湾与新村湾浮游植物光合色素及群落结构的时空分布特征 [J]. 海洋环境科学, 2017, 36(4): 488-494.
- [8] 樊敏玲, 黄小平, 张大文, 等. 海南新村湾海草床主要鱼类及大型无脊椎动物的食源 [J]. 生态学报, 2011, 31(1): 31-38.
- [9] VENDER Z J, CABANA G, RASMUSSEN J B. Comparing trophic position of freshwater fish calculated using stable Nitrogen isotope ratios and literature dietary data[J]. Can J Fish Aquat Sci, 1996, 54(5): 1142-1158.
- [10] 崔莹. 基于稳定同位素和脂肪酸组成的中国近海生态系统物质流动研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2012: 5-10.
- [11] POST D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions[J]. Ecology, 2002, 83(3): 703-718.
- [12] STOWASSER G, ATKINSON A, MCGILL R R, et al. Food web dynamics in the Scotia Sea in summer: a stable isotope study[J]. Deep-Sea Res Pt II, 2012, 59/60(1): 208-221.
- [13] 李忠义, 左涛, 戴芳群, 等. 运用稳定同位素技术研究长江口及南黄海海域春季拖网渔获物的营养级 [J]. 中国水产科学, 2010, 17(1): 103-109.
- [14] LIU H X, LI K Z, HUANG H H, et al. Seasonal community structure of mesozooplankton in the Daya Bay, South China Sea[J]. J Ocean U China, 2013, 12(3): 452-458.
- [15] LAYMAN C A, ARRINGTON D A, MONTAÑA C G, et al. Can stable isotope ratios provide for community-wide measures of trophic structure?[J]. Ecology, 2007, 88(1): 42-48.
- [16] 谢斌, 李云凯, 张虎, 等. 基于稳定同位素技术的海州湾海洋牧场食物网基础及营养结构的季节性变化 [J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2292-2298.
- [17] 宁加佳, 杜飞雁, 王雪辉, 等. 南沙群岛西南部陆架区底层鱼类营养结构研究 [J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(2): 468-475.
- [18] 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.
- [19] 许思思, 宋金明, 李学刚, 等. 渤海渔获物资源结构的变化特征及其影响因素分析 [J]. 自然资源学报, 2014, 29(3): 500-506.
- [20] 黄凯旋, 张云, 欧林坚, 等. 海南岛南北近岸海湾浮游生物对尿素的生物可利用性比较研究 [J]. 海洋科学, 2014, 38(10): 76-82.
- [21] ESPINOZA P, LORRAIN A, MENARD F, et al. Trophic structure in the northern Humboldt Current system: new perspectives from stable isotope analysis[J]. Mar Biol, 2017, 164(4): 86.
- [22] CLAUDINO M C, MACHADO PESSANHA A L, ARAUJO F G, et al. Trophic connectivity and basal food sources sustaining tropical aquatic consumers along a mangrove to ocean gradient[J]. Estuar Coast Shelf S, 2015, 167(SI): 45-55.
- [23] 颜云榕, 张武科, 卢伙胜, 等. 应用碳、氮稳定同位素研究北部湾带鱼 (*Trichiurus lepturus*) 食性及营养级 [J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(1): 192-200.
- [24] 闫光松, 张涛, 赵峰, 等. 基于稳定同位素技术对长江口主要渔业生物营养级的研究 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(11): 3131-3136.
- [25] 张宇美. 基于碳氮稳定同位素的南海鳶乌贼摄食生态与营养级研究 [D]. 湛江: 广东海洋大学, 2014: 24-25.