

文章编号: 1000-0615(2016)04-0585-10

DOI: 10.11964/jfc.20150709965

应用稳定同位素技术研究崂山湾夏季鱼类群落的摄食生态

张波^{1, 2*}, 袁伟^{1, 2}, 戴芳群^{1, 2}

(1. 中国水产科学研究院黄海水产研究所,

农业部海洋渔业资源可持续利用重点开放实验室, 山东青岛 266071;

2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东省渔业资源与生态环境重点实验室, 山东青岛 266071)

摘要: 崂山湾是黄海沿岸众多海湾之一, 也是当前增殖放流的重要水域, 研究该区域鱼类群落结构及其食物网结构, 有着非常重要的生态意义和实用价值。本研究根据2014年6月和8月在崂山湾海域进行的底拖网调查, 分析该海域夏季鱼类群落的优势种组成, 并通过测定稳定同位素对其摄食生态进行研究。结果表明, 崂山湾夏季鱼类群落的优势鱼种共有10种, 包括六丝矛尾鰕虎鱼、中华栉孔鰕虎鱼、红狼牙鰕虎鱼、皮氏叫姑鱼、白姑鱼、小黄鱼、绿鳍鱼、短吻红舌鲷、斑鰾和赤鼻棱鲷; 夏季崂山湾不同月份鱼类群落的优势种组成差异较大。各优势鱼种间 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著差异, 结合胃含物分析结果表明6月鱼类群落食物的主要来源均为底层饵料, 而8月鱼类群落的食物来源则更广泛。崂山湾夏季2个月鱼类群落的优势鱼种间的 $\delta^{15}\text{N}$ 值均存在显著差异, 最大分别相差4.61‰和3.70‰。崂山湾6月鱼类群落的优势种包括了中营养级鱼类和高营养级鱼类, 鱼类群落的平均营养级为3.90, 主要是底栖动物食性鱼类; 而8月鱼类群落的优势种包括了低营养级鱼类和中营养级鱼类, 鱼类群落的平均营养级为3.37, 包括浮游动物食性和底栖动物食性2种食性类型, 以底栖动物食性鱼类为主。线性回归分析表明崂山湾夏季10种优势鱼种除皮氏叫姑鱼、斑鰾、短吻红舌鲷和绿鳍鱼的营养级与体长无线性相关外, 其余优势鱼种的营养级均与体长呈显著的正相关。这主要由于它们随着体长的增加, 摄食高营养级的饵料增加, 低营养级的饵料减少, 自身的营养级也随之升高。

关键词: 鱼类群落; 碳氮稳定同位素; 夏季; 摄食生态; 崂山湾

中图分类号: S 931.1

文献标志码: A

稳定同位素作为一种天然示踪物, 已广泛应用于动植物的生理生态研究中, 在水生生态系统摄食生态的研究中也有大量的应用^[1-4]。由于捕食者的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与其摄食食物的含量非常接近, 一个营养级的富集度通常小于1‰, 可以为食物网架构中食物来源提供信息; $\delta^{15}\text{N}$ 值在每一营养级之间逐层富集, 可用作生物体营养级的指标。尽管稳定同位素分析法不能像胃含物分析方法一样提供摄食食物的种类和大小等信息, 但能提供捕食者摄食食物长期、综合的信息, 反映捕食者实际同化的食物, 而不是摄入多少

食物; 该方法对于仔稚鱼^[2], 以及食物消化程度较大, 空胃率高, 或样品获取较为有限的种类特别有效^[4-5]。因此, 稳定同位素分析法可以弥补传统摄食生态研究方法的不足, 2种方法提供的信息相互弥补, 有助于更全面地认识生态系统的食物关系。

蔡德陵等^[6]1999年采用稳定同位素法研究崂山湾食物网的营养关系, 此后越来越多的研究者将该方法应用到我国近海生态系统的研究中, 取得了大量的研究成果^[7-10]。崂山湾是当前增殖放流的重点海域, 食物网结构发生了较大

收稿日期: 2015-07-13 修回日期: 2015-10-26

资助项目: 国家“九七三”重点基础研究发展计划(2011CB409805); 国家科技支撑计划(2012BAD18B01); 山东省泰山学者工程专项

通信作者: 张波, E-mail: zhangbo@ysfri.ac.cn

的变化^[11]。为进一步摸清该海域资源增殖的生态背景场,本研究采用稳定同位素方法分析崂山湾夏季鱼类群落的摄食生态,为崂山湾鱼类营养生态及食物网架构研究提供科学依据,并为开展增殖放流和实施有效的渔业保护和管理提供基础信息。

1 材料与方法

1.1 样品采集及数据分析

2014年6月和8月,利用中国水产科学研究院黄海水产研究所“黄海星”号科学调查船在崂山湾进行了21个站位的底拖网调查^[11]。定点站位拖网1 h,拖速为3.0 kn。对每站的渔获物进行种类鉴定、计数和称重,用相对重要性指数(IRI)来确定崂山湾鱼类群落中各鱼种的重要性:

$$IRI=(N+W)\times F$$

式中, $N(\%)$ 为某一种类的尾数占渔获总尾数的百分比; $W(\%)$ 为某一种类的重量占渔获总重量的百分比; $F(\%)$ 为某一种类出现的站位数占调查站位数的百分比。根据“简化食物网”的研究策略^[12],本研究选取IRI前6位的鱼种作为崂山湾夏季生态系统的食物关系、营养层次转化中发挥重要功能作用种类来开展研究。

采用Bray-Curtis相似性指数(B)计算夏季崂山湾不同月份间鱼类群落优势种类组成的差异:

$$B(\%) = 100 \times \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^s |x_{ij} - x_{im}|}{\sum_{i=1}^s (x_{ij} + x_{im})} \right]$$

式中, x_{ij} 和 x_{im} 分别为第*i*个种类在*j*月份和*m*月份单位时间的渔获量(经2次平方根转换),*s*为种类数。

1.2 碳氮稳定同位素的测定

取样个体经体长和体质量测定后,取背部肌肉在电热鼓风干燥箱70℃烘干至恒重,磨碎后以备稳定同位素分析。稳定同位素质谱仪为Flash 2000 HT元素分析仪和MAT 253同位素比率质谱仪(Thermo Fisher Scientific, Inc., 美国)相连而成。碳氮稳定同位素比值($\delta^{13}C$ 和 $\delta^{15}N$)是测定后,与国际标准物(PDB和大气 N_2)对比后计算得出,测定精度分别为0.1‰和0.2‰^[11]:

$$\delta^{13}C(\text{‰}) = \left[\frac{(^{13}C/^{12}C)_{\text{样品}}}{(^{13}C/^{12}C)_{\text{标准}}} - 1 \right] \times 1000$$

$$\delta^{15}N(\text{‰}) = \left[\frac{(^{15}N/^{14}N)_{\text{样品}}}{(^{15}N/^{14}N)_{\text{标准}}} - 1 \right] \times 1000$$

式中, $(^{13}C/^{12}C)_{\text{样品}}$ 和 $(^{15}N/^{14}N)_{\text{样品}}$ 为测定所得的样品碳、氮同位素比值; $(^{13}C/^{12}C)_{\text{标准}}$ 和 $(^{15}N/^{14}N)_{\text{标准}}$ 为国际标准物碳、氮同位素比值。

1.3 营养级的计算及数据分析

用氮稳定同位素估算营养级(TL),计算公式:

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

式中, $\delta^{15}N_{\text{consumer}}$ 为研究鱼种的氮同位素比值; $\delta^{15}N_{\text{baseline}}$ 为基线生物的氮同位素比值,为了便于与王田田等^[13]的研究结果进行比较,本研究同样选取渤海浮游动物作为基线生物,氮同位素比值为6.14‰^[7];因基线生物为初级消费者, λ 为2; $\Delta\delta^{15}N$ 为一个营养级间氮同位素的富集值,通常在3‰~5‰,本研究参照Post^[14]的方法,取3.4‰。本研究按营养级大小将鱼类分为低营养级鱼类(TL=3~3.5)、中营养级鱼类(TL=3.5~4)和高营养级鱼类(TL>4)。

鱼类群落平均营养级(\overline{TL}_k)的计算公式:

$$\overline{TL}_k = \sum_{i=1}^m TL_i \times Y_i/Y$$

式中, TL_i 表示种类*i*的营养级, Y_i 表示种类*i*的渔获重量, Y 表示*m*个种类的总渔获重量。

采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)检验种间和月份间碳氮稳定同位素比值等的差异;采用线性回归分析营养级与鱼体长度的相关性。采用SPSS 16.0软件进行统计分析,置信度为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 鱼类群落的优势鱼种

6月和8月共鉴定出26种和35种鱼类。IRI计算结果表明,6月崂山湾鱼类群落的优势鱼种为短吻红舌鲷(*Cynoglossus joyneri*)、皮氏叫姑鱼(*Johnius belengerii*)、六丝矛尾鰕虎鱼(*Amblychaeturichthys hexanema*)、中华栉孔鰕虎鱼(*Ctenotrypauchen chinensis*)、红狼牙鰕虎鱼(*Odontamblyopus rubicundus*)和白姑鱼(*Argyrosomus argentatus*),占6月总渔获量的86.42%,均为底层鱼类;8月的优势鱼种为小黄鱼(*Lanmichthys polyactis*)、斑鲷(*Clupanodon punctatus*)、绿鳍鱼(*Chelidonichthys kumu*)、短吻红舌鲷、六丝矛尾鰕虎鱼和赤鼻棱鲷(*Thriasa*

kammalensis), 占8月总渔获量的84.90%, 中上层鱼类和底层鱼类分别占总渔获量的25.77%和59.13%。夏季崂山湾2个月优势鱼种组成差异较大, Bray-Curtis相似性指数仅为14.88%(表1)。

2.2 稳定同位素比值的特征

6月共分析了301个样品的碳氮稳定同位素比值(表2), 6种优势鱼种的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -20.66‰ ~ -17.53‰ , 最大相差3.13‰, 各种类间碳稳定同位素比值存在显著差异($F=8.203$, $P<0.01$)。Duncan多重比较可将优势鱼种的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分为3组, 依次为红狼牙鰕虎鱼($-19.49\text{‰}\pm 0.69\text{‰}$)<短吻红舌鳎、皮氏叫姑鱼、六丝矛尾鰕虎鱼和白姑鱼($-18.97\text{‰}\pm 0.48\text{‰}$)<中华栉孔鰕虎鱼($-17.77\text{‰}\pm$

0.16‰)。6种优势鱼种的 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 10.86‰ ~ 15.47‰ , 最大相差4.61‰, 各种类间氮稳定同位素比值也存在显著差异($F=37.077$, $P<0.01$)。

8月共分析了333个样品的碳氮稳定同位素比值(表3), 6种优势鱼种的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -21.06‰ ~ -17.33‰ , 最大相差3.73‰, 各种类间碳稳定同位素比值存在显著差异($F=38.723$, $P<0.01$)。Duncan氏多重比较可将优势鱼种的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分为4组, 依次为六丝矛尾鰕虎鱼($-19.76\text{‰}\pm 0.37\text{‰}$)<小黄鱼和赤鼻棱鯧($-19.11\text{‰}\pm 0.47\text{‰}$)<绿鳍鱼和短吻红舌鳎($-18.36\text{‰}\pm 0.35\text{‰}$)<斑鰾($-17.82\text{‰}\pm 0.25\text{‰}$)。6种优势鱼种的 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 9.40‰ ~ 13.10‰ , 最大相差3.70‰, 各种类间氮稳定同位素比值也存在显著差异($F=21.209$, $P<0.01$)。

表1 崂山湾夏季鱼类群落的优势鱼种

Tab. 1 Dominant species of fish community in Laoshan Bay during summer

种类 species	6月 June				8月 August			
	W/%	N/%	F/%	IRI	W/%	N/%	F/%	IRI
短吻红舌鳎 <i>C. joyneri</i>	38.03	30.23	89.47	6107	4.07	5.12	66.67	613
皮氏叫姑鱼 <i>J. belengerii</i>	28.36	26.36	78.95	4320				
六丝矛尾鰕虎鱼 <i>A. shexanema</i>	5.09	14.35	73.68	1432	0.81	1.92	55.56	152
中华栉孔鰕虎鱼 <i>C. chinensis</i>	1.89	13.69	78.95	1230				
红狼牙鰕虎鱼 <i>O. rubicundus</i>	8.22	7.24	31.58	488				
白姑鱼 <i>A. argentatus</i>	4.83	0.68	26.32	145				
小黄鱼 <i>L. polyactis</i>					35.72	45.95	66.67	5445
斑鰾 <i>C. punctatus</i>					25.09	18.84	55.56	2441
绿鳍鱼 <i>C. kumu</i>					18.53	6.27	50.00	1240
赤鼻棱鯧 <i>T. kammalensis</i>					0.68	3.62	44.44	191

表2 崂山湾6月优势鱼种的碳氮稳定同位素比值

Tab. 2 Stable carbon and nitrogen isotope ratio of dominant fish species in Laoshan Bay in June

种类 species	体长/mm body length		$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$		$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$		TL			数量/尾 number
	范围 range	平均值 mean	范围 range	平均值 mean	范围 range	平均值 mean	范围 range	平均值 mean		
短吻红舌鳎 <i>C. joyneri</i>	77~197	143.64±24.12	-20.00~-18.06	-18.99±0.46	10.86~12.45	11.88±0.40	3.39~3.86	3.69±0.12		50
皮氏叫姑鱼 <i>J. belengerii</i>	80~109	95.03±6.49	-19.75~-18.46	-18.99±0.33	12.51~13.71	13.31±0.31	3.87~4.23	4.11±0.09		100
六丝矛尾鰕虎鱼 <i>A. shexanema</i>	54~115	72.19±11.61	-19.51~-17.76	-18.86±0.47	11.20~13.71	12.28±0.55	3.49~4.23	3.80±0.16		100
中华栉孔鰕虎鱼 <i>C. chinensis</i>	54~87	70.72±9.44	-17.96~-17.53	-17.77±0.16	13.11~13.55	13.31±0.17	4.05~4.18	4.11±0.05		18
红狼牙鰕虎鱼 <i>O. rubicundus</i>	130~200	156.11±20.89	-20.25~-17.87	-19.49±0.69	12.28~14.38	13.06±0.57	3.81~4.42	4.04±0.17		9
白姑鱼 <i>A. argentatus</i>	128~194	152.67±21.98	-20.66~-17.96	-19.01±0.60	12.30~15.47	13.50±0.66	3.81~4.74	4.16±0.19		24

表3 崂山湾8月优势鱼种的碳氮稳定同位素比值

Tab. 3 Stable carbon and nitrogen isotope ratio of dominant fish species in Laoshan Bay in August

种类 species	标准长度/mm standard body length		$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$		$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$		TL		数量/尾 number
	范围 range	平均值 mean	范围 range	平均值 mean	范围 range	平均值 mean	范围 range	平均值 mean	
小黄鱼 <i>L. polyactis</i>	67~172	95.77±19.06	-21.06~-18.39	-19.08±0.46	9.82~11.95	10.62±0.58	3.08~3.71	3.32±0.17	142
斑鲦 <i>C. punctatus</i>	89~124	107.30±8.42	-18.33~-17.45	-17.82±0.25	9.91~13.10	11.55±1.02	3.11~4.05	3.59±0.30	60
绿鳍鱼 <i>C. kumu</i>	94~153	119.54±14.86	-19.05~-17.96	-18.40±0.29	9.40~11.07	9.95±0.40	2.96~3.45	3.12±0.12	35
短吻红舌鲷 <i>C. joyneri</i>	102~177	134.21±18.59	-18.80~-17.33	-18.31±0.43	11.23~12.22	11.77±0.31	3.50~3.79	3.65±0.09	34
赤鼻棱鲷 <i>T. kammalensis</i>	45~75	54.02±5.88	-20.29~-18.71	-19.24±0.51	10.39~10.81	10.58±0.16	3.25~3.37	3.31±0.05	49
六丝矛尾鰕虎鱼 <i>A. hexanema</i>	32~88	49.31±18.96	-20.13~-19.33	-19.76±0.37	9.97~11.71	10.98±0.79	3.13~3.64	3.42±0.23	13
白姑鱼 <i>A. argentatus</i>	61~171	94.36±32.83	-19.64~-18.03	-18.62±0.45	11.16~13.85	12.21±1.13	3.48~4.27	3.78±0.33	28

6月和8月的平均碳稳定同位素比值分别为 $-18.95\text{‰}\pm 0.57\text{‰}$ 和 $-18.78\text{‰}\pm 0.66\text{‰}$ ，单因素方差分析表明存在差异($F=4.340$, $P=0.038$)；平均氮稳定同位素比值分别为 $12.77\text{‰}\pm 0.82\text{‰}$ 和 $10.77\text{‰}\pm 0.80\text{‰}$ ，单因素方差分析表明存在显著差异($F=345.405$, $P<0.01$)。短吻红舌鲷和六丝矛尾鰕虎鱼是崂山湾夏季2个月共有的优势鱼种，另外，本研究还同时测定了8月28个白姑鱼的碳氮稳定同位素比值(表3)。结果表明，2个月间短吻红舌鲷碳稳定同位素比值存在显著差异($F=20.335$, $P<0.01$)，而氮稳定同位素比值不存在差异($F=0.886$, $P=0.353$)；2个月间六丝矛尾鰕虎鱼碳氮稳定同位素比值均存在显著差异($\delta^{13}\text{C}$: $F=19.226$, $P<0.01$; $\delta^{15}\text{N}$: $F=22.085$, $P<0.01$)；2个月间白姑鱼碳稳定同位素比值不存在差异($F=3.818$, $P=0.059$)，而氮稳定同位素比值存在显著差异($F=18.221$, $P<0.01$)。

2.3 不同月份间营养级的变化

崂山湾6月鱼类群落的优势种包括了中营养级鱼类和高营养级鱼类(表2)，其中短吻红舌鲷和六丝矛尾鰕虎鱼属中营养级鱼类，平均营养级为 3.75 ± 0.15 ；皮氏叫姑鱼、中华栉孔鰕虎鱼、红狼牙鰕虎鱼和白姑鱼属高营养级鱼类，平均营养级为 4.12 ± 0.15 。崂山湾8月鱼类群落的优势种包括低营养级鱼类和中营养级鱼类(表3)，其中小黄鱼、绿鳍鱼、赤鼻棱鲷和六丝矛尾鰕虎鱼属低营养级鱼类，平均营养级为 3.28 ± 0.18 ；斑鲦和短吻红舌鲷属中营养级鱼类，平均营养级为 3.62 ± 0.22 。

崂山湾6月鱼类群落的平均营养级为3.90，高于8月鱼类群落的平均营养级3.37。作为崂山湾夏季2个月共有的优势鱼种，短吻红舌鲷的体长没有显著差异($F=3.700$, $P=0.058$)，营养级也没有显著差异；6月六丝矛尾鰕虎鱼的体长($F=37.848$, $P<0.01$)和营养级均显著大于8月；白姑鱼6月的体长($F=54.647$, $P<0.01$)和营养级也均显著大于8月。

2.4 营养级与体长的关系

线性回归分析表明，崂山湾夏季10种优势鱼种中，体长范围为80~109 mm的皮氏叫姑鱼($R^2<0.001$, $F=0.008$, $P=0.930$)、77~197 mm的短吻红舌鲷($R^2=0.008$, $F=0.284$, $P=0.597$)、94~153 mm的绿鳍鱼($R^2=0.003$, $F=0.055$, $P=0.817$)和叉长范围为89~124 mm的斑鲦($R^2=0.099$, $F=1.430$, $P=0.253$)的营养级与体长无线性相关；其余3种鰕虎鱼类(六丝矛尾鰕虎鱼、中华栉孔鰕虎鱼和红狼牙鰕虎鱼)，2种石首鱼类(白姑鱼和小黄鱼)和赤鼻棱鲷的营养级均与体长呈显著的正相关(表4)，即在本研究的体长范围内，它们的营养级随体长的增加而增加。

3 讨论

崂山湾夏季鱼类群落的优势鱼种共有10种，包括3种鰕虎鱼类(六丝矛尾鰕虎鱼、中华栉孔鰕虎鱼和红狼牙鰕虎鱼)，3种石首鱼类(皮氏叫姑鱼、白姑鱼和小黄鱼)，以及2种底层鱼类(绿鳍鱼和短吻红舌鲷)和2种中上层鱼类(斑鲦和赤鼻棱鲷)。与春季崂山湾鱼类群落相比，优势种组

表 4 崂山湾夏季优势鱼种营养级与体长的线性回归

Tab. 4 Linear regression between trophic level (TL) and body length (BL) of dominant fish species in Laoshan Bay during summer

种类 species	长度范围/mm length range	线性回归方程 linear regression equation
六丝矛尾鰕虎鱼 <i>A. hexanema</i>	32~115	TL=2.927 + 0.011BL ($R^2=0.557$, $F=35.240$, $P<0.01$)
中华栉孔鰕虎鱼 <i>C. chinensis</i>	54~87	TL=3.779 + 0.005 BL ($R^2=0.963$, $F=77.481$, $P=0.003$)
红狼牙鰕虎鱼 <i>O. rubicundus</i>	130~200	TL=3.199 + 0.005 BL ($R^2=0.452$, $F=5.781$, $P=0.047$)
白姑鱼 <i>A. argentatus</i>	61~194	TL=3.133+ 0.06 BL ($R^2=0.515$, $F=34.983$, $P<0.01$)
小黄鱼 <i>L. polyactis</i>	67~172	TL=2.862 + 0.004 BL ($R^2=0.361$, $F=32.740$, $P<0.01$)
赤鼻棱鲷 <i>T. kammalensis</i>	45~75	TL=3.101 + 0.004 BL ($R^2=0.413$, $F=5.625$, $P=0.045$)

成变化较大^[11], 呈明显的季节更替。夏季崂山湾 2 个月鱼类群落的差异表现为优势鱼种组成差异较大, 相似性指数仅为 14.88%, 表明季节内优势种的更替较显著, 莱州湾夏季鱼类群落也有类似的现象^[15]; 从个体大小分析, 8 月的六丝矛尾鰕虎鱼和白姑鱼的体长都显著小于 6 月, 而且鱼类群落以幼鱼居多; 从生态类型分析, 6 月鱼类群落均为底层鱼类, 8 月鱼类群落包括了中上层鱼类和底层鱼类。根据测定的碳氮同位素比值, 结合胃含物分析结果可以进一步分析崂山湾夏季鱼类群落的摄食生态。

3.1 $\delta^{13}\text{C}$ 值与摄食习性

崂山湾夏季鱼类群落的各优势鱼种间 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著差异, 按 $\delta^{13}\text{C}$ 值大小排序的结果: 8 月六丝矛尾鰕虎鱼 ($-19.76\text{‰} \pm 0.37\text{‰}$) < 6 月红狼牙鰕虎鱼 ($-19.49\text{‰} \pm 0.69\text{‰}$) < 8 月小黄鱼和赤鼻棱鲷 ($-19.11\text{‰} \pm 0.47\text{‰}$) < 6 月短吻红舌鲷、皮氏叫姑鱼、六丝矛尾鰕虎鱼和白姑鱼 ($-18.97\text{‰} \pm 0.48\text{‰}$) < 8 月绿鳍鱼和短吻红舌鲷 ($-18.36\text{‰} \pm 0.35\text{‰}$) < 8 月斑鲷 ($-17.82\text{‰} \pm 0.25\text{‰}$) < 6 月中华栉孔鰕虎鱼 ($-17.77\text{‰} \pm 0.16\text{‰}$)。由于 $\delta^{13}\text{C}$ 值随着生物栖息水层深度增加而增大, 即生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值由中上层向底层逐渐增大^[16], 因此, 根据测定的碳稳定同位素比值, 结合以往采用胃含物分析方法对这些优势鱼种摄食习性的研究结果^[13, 17-21], 可以更明确它们的摄食习性: ① 尽管 3 种鰕虎鱼均为底栖动物食性, 但 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异却较大。8 月六丝矛尾鰕虎鱼的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最小, 而 6 月 $\delta^{13}\text{C}$ 值增加, 这与其在个体较小时摄食一定比例的桡足类, 随着体长的增加, 摄食浮游动物、底栖动物的比例逐渐减

少, 而摄食虾类的比例增加的摄食习性相关^[17-18]。红狼牙鰕虎鱼的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较小也与其摄食一定比例的桡足类相关^[18]。而中华栉孔鰕虎鱼的 $\delta^{13}\text{C}$ 值最大, 与其主要摄食钩虾类、涟虫类和腹足类的底栖动物饵料相关^[19]。② 3 种石首鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的差异也较大, 与小黄鱼幼鱼为浮游动物食性, 而皮氏叫姑鱼为底层虾食性, 白姑鱼为虾/鱼食性^[19]的摄食习性相关。③ 摄食一定比例底层虾类和鱼类的底层鱼类(如皮氏叫姑鱼、白姑鱼和短吻红舌鲷)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值小于主要摄食底栖动物饵料的底层鱼类(中华栉孔鰕虎鱼)的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。④ 斑鲷和赤鼻棱鲷这 2 种中上层鱼类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异也大。赤鼻棱鲷为浮游动物食性^[19], $\delta^{13}\text{C}$ 值较小; 而斑鲷的摄食习性较为复杂, 胃含物分析表明斑鲷为兼食浮游植物、浮游动物和底栖动物的杂食性鱼类^[19-20], 或底栖动物食性鱼类^[21]; 王田田等^[13]采用稳定同位素分析法研究发现莱州湾叉长范围为 83~160 mm 的斑鲷碳稳定同位素比值范围较宽 ($-20.92\text{‰} \sim -11.67\text{‰}$), 说明食物来源范围较广。而本研究中叉长范围为 89~124 mm 斑鲷的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较大, 范围为 $-18.33\text{‰} \sim -17.45\text{‰}$, 应该主要摄食底栖动物饵料。可见斑鲷的摄食习性也受体长变化的影响。随着体长增加, 摄食的食物来源更广, 食物中浮游生物饵料比例的增加, 也就导致了斑鲷的营养级随叉长的增加而降低^[13]。

综上所述, 碳稳定同位素比值与胃含物分析结果相互佐证能更好地反映捕食者的食物来源, 崂山湾 6 月鱼类群落的主要食物来源均为底层饵料, 而 8 月鱼类群落的食物来源则更广泛。

3.2 $\delta^{15}\text{N}$ 值与营养级

崂山湾夏季 2 个月鱼类群落的优势鱼种间的

$\delta^{15}\text{N}$ 值存在显著差异,最大分别相差4.61‰和3.70‰,超过了1个营养级的差异。崂山湾6月鱼类群落的优势种包括了中营养级鱼类和高营养级鱼类,而8月鱼类群落的优势种包括了低营养级鱼类和中营养级鱼类。6月六丝矛尾鰕虎鱼属中营养级鱼类,而8月则属低营养级鱼类,这是由于其个体大小差异,摄食食物种类不同导致的^[17-18]。小黄鱼幼鱼、赤鼻棱鳀和绿鳍鱼属低营养级鱼类;斑鰾和短吻红舌鳎属中营养级鱼类;皮氏叫姑鱼、中华栉孔鰕虎鱼、红狼牙鰕虎鱼和白姑鱼属高营养级鱼类。10种优势鱼种中除中华栉孔鰕虎鱼和红狼牙鰕虎鱼外,均与按胃含物分析结果计算的营养级相吻合^[22]。即低营养级鱼类(TL=3~3.5)主要摄食浮游生物和小型底栖动物;中营养级鱼类(TL=3.5~4)主要摄食小型底栖动物和底层虾蟹类;而高营养级鱼类(TL>4),主要摄食底层虾蟹类和低营养级鱼类。采用胃含物分析方法计算中华栉孔鰕虎鱼和红狼牙鰕虎鱼的营养级低于本研究结果的主要原因是根据胃含物分析结果进行营养级计算时所引用的饵料营养级^[22]有可能低于其实际的营养级^[23-24]。因此,进一步研究饵料生物的营养级是非常重要的。

崂山湾6月鱼类群落的平均营养级为3.90,主要是底栖动物食性鱼类;8月鱼类群落的平均营养级为3.37,包括浮游动物食性和底栖动物食性2种食性类型,以底栖动物食性鱼类为主。春季崂山湾鱼类群落的平均营养级为3.52,主要包括了浮游动物食性、杂食性和底栖动物食性3种食性类型,以底栖动物食性鱼类为主^[11]。可见,崂山湾鱼类群落的平均营养级存在显著的季节差异。

由于同位素基准的可变性可以显著影响消费者营养级的评估,因此,稳定同位素法在摄食生态的成功应用还有赖于同位素基准生物的正确选择^[25]。然而,在已有的稳定同位素研究中,基线生物的选择及其 $\delta^{15}\text{N}$ 值都有较大差异,大的可达10.64‰^[26],小的有4.32‰^[27],接近2个营养级的差异,非常不利于研究结果的分析。因此,对各海域生态系统基准生物的深入研究应该是非常必要的。另外,Pinnegar等^[28]采用稳定同位素法研究发现地中海西部渔获物的营养级在26年间下降了0.15,因此在采用胃含物分析方法研究我国近海生态系统渔获物平均营养级长期变化^[29-30]的同时,采用稳定同位素法开展研

究也是非常必要的。

3.3 营养级随体长的变化

鱼类摄食随体长变化是一个普遍的现象,不同体长的同一种鱼在生态系统中有可能处于不同的营养阶层。崂山湾夏季鱼类群落优势鱼种中的3种鰕虎鱼类(六丝矛尾鰕虎鱼、中华栉孔鰕虎鱼和红狼牙鰕虎鱼),2种石首鱼类(白姑鱼和小黄鱼)和赤鼻棱鳀的营养级均与体长呈显著的正相关。结合胃含物分析结果表明六丝矛尾鰕虎鱼、小黄鱼和白姑鱼的营养级的这种变化与摄食习性随体长的变化规律密切相关,它们或者在一定体长阶段发生显著的食性转换,如小黄鱼^[31-33];或者摄食食物种类随体长的增加发生变化,如六丝矛尾鰕虎鱼^[17]和白姑鱼^[32]。但总体来说,它们都是随着体长的增加,摄食高营养级的饵料增加,低营养级的饵料减少,因此自身的营养级也随之升高。本研究中叉长为45~75 mm[平均(54.02±5.88) mm]的赤鼻棱鳀营养级随叉长的增加而增加,而叉长为63~118 mm[平均(97.45±14.38) mm]的赤鼻棱鳀营养级随叉长的变化不显著^[13]。这表明赤鼻棱鳀幼鱼阶段的摄食变化较大,而进入成鱼阶段,摄食习性相对稳定。

崂山湾夏季鱼类群落优势鱼种中的皮氏叫姑鱼、斑鰾、短吻红舌鳎和绿鳍鱼在本研究的体长范围内未发现营养级与体长呈线性相关。根据薛莹等^[34]对皮氏叫姑鱼摄食习性随体长变化的研究,80~109 mm体长范围的皮氏叫姑鱼摄食的食物种类变化不大,因此营养级也没有变化。王田田等^[13]采用稳定同位素分析法的研究结果表明83~160 mm叉长范围的斑鰾营养级随叉长增加而降低,然而选取他们研究中叉长在83~124 mm范围的数据重新进行分析发现,此叉长范围内的营养级与叉长并无显著相关($F=0.008$, $P=0.930$),这与本研究的结果是一致的。

综上所述,在鱼类摄食生态的研究中,无论是胃含物分析方法,还是稳定同位素法,体长都是一个需要重点考虑的因素。另外,还应该注意的,尽管稳定同位素方法能提供摄食食物长期、综合的信息,但为了克服个体样本的信息偏差,更准确地反映种群的摄食习性和营养级,如同胃含物分析一样,采用稳定同位素法开展研究时,测试样本还是必须满足一定量的要求。

参考文献:

- [1] Gu B, Schelske C L, Hoyer M V. Stable isotopes of carbon and nitrogen as indicators of diet and trophic structure of the fish community in a shallow hypereutrophic lake[J]. *Journal of Fish Biology*, 1996, 49(6): 1233–1243.
- [2] Vander Zanden M J, Hulshof M, Ridgway M S, *et al.* Application of stable isotope techniques to trophic studies of age-0 small mouth bass[J]. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1998, 127(5): 729–739.
- [3] Overman N C, Parrish D L. Stable isotope composition of walleye: ^{15}N accumulation with age and area-specific differences in $\delta^{13}\text{C}$ [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2001, 58(6): 1253–1260.
- [4] Renones O, Polunin N V C, Goni R. Size related dietary shifts of *Epinephelus marginatus* in a western Mediterranean littoral ecosystem: an isotope and stomach content analysis[J]. *Journal of Fish Biology*, 2002, 61(1): 122–137.
- [5] Vizzini S, Mazzola A. Stable isotopes and trophic positions of littoral fishes from a mediterranean marine protected area[J]. *Environmental Biology of Fishes*, 2009, 84(1): 13–25.
- [6] 蔡德陵, 毛兴华, 韩贻兵. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值在海洋生态系统营养关系研究中的应用——海洋植物的同位素组成及其影响因素的初步探讨[J]. *海洋与湖沼*, 1999, 30(3): 306–314.
- Cai D L, Mao X H, Han Y B. Application of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios to studies of trophic relation in a marine ecosystem—preliminary inquiry into isotopic compositions of marine plant and their influence factors[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1999, 30(3): 306–314 (in Chinese).
- [7] 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): 708–712.
- Wan Y, Hu J Y, An L H, *et al.* Determination of trophic relationships within a Bohai Bay food web using stable $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ analysis[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(7): 708–712 (in Chinese).
- [8] 李忠义, 左涛, 戴芳群, 等. 长江口及南黄海水域春季生物摄食生态的稳定同位素研究[J]. *水产学报*, 2009, 33(5): 784–789.
- Li Z Y, Zuo T, Dai F Q, *et al.* Study on feeding habits of organisms from Changjiang Estuary and adjacent Southern Yellow Sea in spring with stable isotope technology[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2009, 33(5): 784–789 (in Chinese).
- [9] 孙明, 刘修泽, 李轶平, 等. 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[J]. *中国水产科学*, 2013, 20(1): 189–197.
- Sun M, Liu X Z, Li Y P, *et al.* Trophic level analysis of key species in Liaodong Bay using stable nitrogen isotopes[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(1): 189–197 (in Chinese).
- [10] 李凡, 徐炳庆, 马元庆, 等. 莱州湾鱼类群落同功能种团的季节变化[J]. *生态学报*, 2014, 34(7): 1736–1745.
- Li F, Xu B Q, Ma Y Q, *et al.* Seasonal changes of functional guilds of fish community in Laizhou Bay, East China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(7): 1736–1745 (in Chinese).
- [11] 张波, 袁伟, 王俊. 崂山湾春季鱼类群落的摄食生态及其主要种类[J]. *中国水产科学*, 2015, 22(4): 820–827.
- Zhang B, Yuan W, Wang J. Feeding ecology of the dominant fish species in spring in Laoshan Bay[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2015, 22(4): 820–827 (in Chinese).
- [12] 唐启升. 海洋食物网与高营养层次营养动力学研究策略[J]. *海洋水产研究*, 1999, 20(2): 1–6.
- Tang Q S. Strategies of research on marine food web and trophodynamics between high trophic levels[J]. *Marine Fisheries Research*, 1999, 20(2): 1–6 (in Chinese).
- [13] 王田田, 吕振波, 李凡, 等. 基于稳定碳氮同位素的莱州湾4种鳀鲱科鱼类营养级研究[J]. *中国水产科学*, 2013, 20(5): 1076–1085.
- Wang T T, Lü Z B, Li F, *et al.* Determination of the trophic levels of four fish species in Engraulidae and Clupeidae in Laizhou Bay based on stable carbon and nitrogen isotopes[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(5): 1076–1085 (in Chinese).
- [14] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions[J]. *Ecology*, 2002, 83(3): 703–718.
- [15] 孙鹏飞, 单秀娟, 吴强, 等. 莱州湾及黄河口水域鱼类群落结构的季节变化[J]. *生态学报*, 2014, 34(2): 367–376.

- Sun P F, Shan X J, Wu Q, *et al.* Seasonal variations in fish community structure in the Laizhou Bay and the Yellow River Estuary[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(2): 367–376 (in Chinese).
- [16] Davenport S R, Bax N J. A trophic study of a marine ecosystem off southeastern Australia using stable isotopes of carbon and nitrogen[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2002, 59(3): 514–530.
- [17] 韩东燕, 薛莹, 纪毓鹏, 等. 胶州湾六丝钝尾虾虎鱼的摄食生态特征[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(5): 1146–1452.
- Han D Y, Xue Y, Ji Y P, *et al.* Feeding ecology of *Amblychaeturichthys hexanema* in Jiaozhou Bay, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(5): 1146–1452 (in Chinese).
- [18] 韩东燕, 薛莹, 纪毓鹏, 等. 胶州湾5种虾虎鱼类的营养和空间生态位[J]. *中国水产科学*, 2013, 20(1): 148–156.
- Han D Y, Xue Y, Ji Y P, *et al.* Trophic and spatial niche of five gobiid fishes in Jiaozhou Bay[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(1): 148–156 (in Chinese).
- [19] 张波, 李忠义, 金显仕. 渤海鱼类群落功能群及其主要种类[J]. *水产学报*, 2012, 36(1): 64–72.
- Zhang B, Li Z Y, Jin X S. Functional groups of fish assemblages and their major species in the Bohai Sea[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2012, 36(1): 64–72 (in Chinese).
- [20] 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.
- Wei S, Jiang W M. Study on food web of fishes in the Yellow Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1992, 23(2): 182–192 (in Chinese).
- [21] 邓景耀, 姜卫民, 杨纪明, 等. 渤海主要生物种间关系及食物网的研究[J]. *中国水产科学*, 1997, 4(4): 1–7.
- Deng J Y, Jiang W M, Yang J M, *et al.* Species interaction and food web of major predatory species in the Bohai Sea[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 1997, 4(4): 1–7 (in Chinese).
- [22] 张波, 唐启升. 渤、黄、东海高营养层次重要生物资源种类的营养级研究[J]. *海洋科学进展*, 2004, 22(4): 393–404.
- Zhang B, Tang Q S. Study on trophic level of important resources species at high trophic levels in the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea[J]. *Advances in Marine Science*, 2004, 22(4): 393–404 (in Chinese).
- [23] Saage A, Altin D, Vadstein O, *et al.* Trophic position of *Calanus finmarchicus* (Copepoda, Calanoida) in the Trondheim Fjord[J]. *Journal of Sea Research*, 2008, 59(3): 162–172.
- [24] Pinkerton M H, Forman J, Bury S J, *et al.* Diet and trophic niche of Antarctic silverfish *Pleuragramma antarcticum* in the Ross Sea, Antarctica[J]. *Journal of Fish Biology*, 2013, 82(1): 141–164.
- [25] 徐军, 张敏, 谢平. 氮稳定同位素基准的可变性及其对营养级评价的影响[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(1): 8–20.
- Xu J, Zhang M, Xie P. Variability of stable nitrogen isotopic baselines and its consequence for trophic modeling[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(1): 8–20 (in Chinese).
- [26] 杨国欢, 孙省利, 侯秀琼, 等. 基于稳定同位素方法的珊瑚礁鱼类营养层次研究[J]. *中国水产科学*, 2012, 19(1): 105–115.
- Yang G H, Sun X L, Hou X Q, *et al.* Measurement of the trophic level of fish in a coral reef ecosystem using stable isotopes[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2012, 19(1): 105–115 (in Chinese).
- [27] 郭旭鹏, 李忠义, 金显仕, 等. 采用碳氮稳定同位素技术对黄海中南部鳀鱼食性的研究[J]. *海洋学报*, 2007, 29(2): 98–104.
- Guo X P, Li Z Y, Jin X S, *et al.* Feeding habit study of anchovy (*Engraulis japonicus*) in the central and southern part of the Huanghai Sea with stable isotope techniques[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2007, 29(2): 98–104 (in Chinese).
- [28] Pinnegar J K, Polunin N V C, Badalamenti F. Long-term changes in the trophic level of western mediterranean fishery and aquaculture landings[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2003, 60(2): 222–235.
- [29] Zhang B, Tang Q, Jin X. Decadal-scale variations of trophic levels at high trophic levels in the Yellow Sea and the Bohai Sea ecosystem[J]. *Journal of Marine Systems*, 2007, 67(3–4): 304–311.
- [30] 张波, 吴强, 金显仕. 1959–2011年莱州湾渔业资源群落食物网结构的变化[J]. *中国水产科学*, 2015, 22(2): 278–287.

- Zhang B, Wu Q, Jin X S. Interannual variation in the food web of commercially harvested species in Laizhou Bay from 1959 to 2011[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2015, 22(2): 278–287 (in Chinese).
- [31] Xue Y, Jin X, Zhang B, *et al.* Seasonal, diel and ontogenetic variation in feeding patterns of small yellow croaker in the central Yellow Sea[J]. *Journal of Fish Biology*, 2005, 67(1): 33–50.
- [32] 张波, 金显仕, 戴芳群. 长江口两种重要石首鱼类的摄食习性[J]. *动物学报*, 2008, 54(2): 209–217.
- Zhang B, Jin X S, Dai F Q. Feeding habits of the two sciaenid fishes near the Changjiang estuary[J]. *Acta Zoologica Sinica*, 2008, 54(2): 209–217 (in Chinese).
- [33] 郭斌, 张波, 金显仕. 黄海海州湾小黄鱼幼鱼的食性及其随体长的变化[J]. *中国水产科学*, 2010, 17(2): 289–297.
- Guo B, Zhang B, Jin X S. Diet composition and ontogenetic variation in feeding habits of juvenile small yellow croaker *Pseudosciaena polyactis* Bleeker in the Yellow Sea[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2010, 17(2): 289–297 (in Chinese).
- [34] 薛莹, 金显仕, 张波, 等. 南黄海三种石首鱼类的食性[J]. *水产学报*, 2005, 29(2): 178–187.
- Xue Y, Jin X S, Zhang B, *et al.* Feeding habits of three sciaenid fishes in the southern Yellow Sea[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2005, 29(2): 178–187 (in Chinese).

Study on feeding ecology of fish community in Laoshan Bay during summer using stable carbon and nitrogen isotopes

ZHANG Bo^{1,2*}, YUAN Wei^{1,2}, DAI Fangqun^{1,2}

(1. Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fishery Resources, Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China;

2. Key Laboratory for Fishery Resources and Eco-environment, Shandong Province, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: Laoshan Bay is one of numerous gulfs of the Yellow Sea and an important fish enhancement and release area. It is vital for the Yellow Sea fishery resources that carry out proliferation and implement effective fisheries conservation and management in Laoshan Bay ecosystem. Based on bottom trawl survey conducted in Laoshan Bay in June and August 2014, the dominant fish species of fish community during summer were analyzed and their feeding ecology was studied by stable carbon and nitrogen isotopes method. The stable carbon isotope ratio ($\delta^{13}\text{C}$) is often used to assess basal sources in food web with a slight enrichment, while the stable nitrogen isotope ratio ($\delta^{15}\text{N}$) is indicator of trophic level, as a major increase with each trophic level. In terms of the index of relative importance (IRI), there were 10 dominant species of fish community in Laoshan Bay during summer, including *Amblychaeturichthys hexanema*, *Ctenotrypauchen chinensis*, *Odontamblyopus rubicundus*, *Johnius belengerii*, *Argyrosomus argentatus*, *Lanmichthys polyactis*, *Chelidonichthys kumu*, *Cynoglossus joyneri*, *Clupanodon punctatus* and *Thrissa kammalensis*. There were significant differences in dominant fish species composition of fish community between two months in summer. The range of $\delta^{13}\text{C}$ of dominant fish species ranged from -20.66‰ to -17.53‰ in June and from -21.06‰ to -17.33‰ in August. There were significant differences in $\delta^{13}\text{C}$ between dominant fish species. According to $\delta^{13}\text{C}$ of this research, combining with results of stomach contents analysis, the results show that the main food source of fish community was benthic prey in June, but the food source of fish community was more extensive in August. The range of $\delta^{15}\text{N}$ of dominant fish species was 10.86‰ – 15.47‰ in June and 9.40‰ – 13.10‰ in August. There were significant differences in $\delta^{15}\text{N}$ between dominant fish species and the biggest difference were 4.61‰ and 3.70‰ , respectively. The dominant species of fish community in Laoshan Bay in June included fish with middle trophic level and high trophic level, the mean trophic level of fish community was 3.90, and was mainly benthivores. The dominant species of fish community in Laoshan Bay in August included fish with middle trophic level and low trophic level, the mean trophic level of fish community was 3.37, including zooplankivores and benthivores, mainly benthivores. Linear regression analysis showed that in addition to *J. belengerii*, *C. punctatus*, *C. joyneri* and *C. kumu*, whose trophic level showed not linear correlation with the length, and the trophic level of rest of the dominant species was significantly positive correlation with the body length. This was mainly because with the increase of body length, they increase feeding on prey with high trophic level, but reduce feeding on prey with low trophic level, and their trophic level also increases.

Key words: fish community; stable carbon and nitrogen isotopes; summer; feeding ecology; Laoshan Bay

Corresponding author: ZHANG Bo. E-mail: zhangbo@ysfri.ac.cn

Funding projects: National Basic Research Program (973 Program) (2011CB409805); National Key Technology R & D Program of China (2012BAD18B01); Taishan Scholar Program of Shandong Province