

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20191025001

http://www.yykxjz.cn/

白怀宇, 王玉堃, 张廷廷, 黄凌风, 孙耀. 基于碳、氮稳定同位素研究黄海及东海北部主要鱼类的营养级和食性. 渔业科学进展, 2021, 42(2): 10-17

Bai HY, Wang YK, Zhang TT, Huang LF, Sun Y. Trophic levels and feeding characters of marine fishes in the Yellow Sea and northern East China Sea based on stable isotope analysis. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(2): 10-17

基于碳、氮稳定同位素研究黄海及东海北部 主要鱼类的营养级和食性*

白怀宇¹ 王玉堃² 张廷廷² 黄凌风^{1,3①} 孙耀^{2,4①}

- (1. 厦门大学环境与生态学院 厦门 361102; 2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 青岛 266071;
3. 滨海湿地生态系统教育部重点实验室 厦门 361102;
4. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室 青岛 266071)

摘要 本研究通过对 2011~2014 年间在黄海及东海北部采集的 36 种海洋鱼类进行碳、氮稳定同位素测定, 利用碳稳定同位素比值($\delta^{13}\text{C}$)计算底层饵料贡献比(Bp)来确定鱼类的食性, 利用氮稳定同位素比值($\delta^{15}\text{N}$)计算其营养级(TL)。结果显示, 这 36 种鱼类的营养级范围为 2.75~4.34, 平均值为 3.47。其中, 4 种为完全浮游生物食性, 8 种为底栖生物食性, 完全底栖生物食性为 12 种, 混合食性为 12 种。中(TL=3.5~4)、低(TL<3.5)营养级的种类占大多数(91.67%), 而高营养级(TL>4)种类较少, 仅为 3 种, 且全部为混合食性。营养级的研究结果与 1986、1992 和 2004 年的研究对比发现, 个别种类发生了改变。如蓝点马鲛(*Scomberomorus niphonius*)营养级有不同程度的下降; 而黄鲫(*Setipinna taty*)却有不同程度的上升。食性的研究结果与 2004、2009 和 2011 年的研究对比发现, 有些种类食性发生了较大变化, 如白姑鱼(*Argyrosomus argentatus*); 有些种类食性几乎没有变化, 如小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)。

关键词 碳、氮稳定同位素; 营养级; 食性

中图分类号 S931.1 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2021)02-0010-08

稳定同位素是一种天然的示踪物质, 近年来, 在海洋生物学及生态学的研究中受到越来越多的重视(蔡德陵等, 2005; 孙明等, 2013; Ohshimo *et al.*, 2019)。生物体内的碳稳定同位素比值($\delta^{13}\text{C}$)受其代谢活动及摄食情况等多方面的影响, 在生物体对其饵料进行同化吸收时富集值极低, 因此, 可用来判断摄食者的食物来源(张波等, 2016)。而氮稳定同位素在生物体内富集系数较大, 在消费者和其食物之间以平均 3.4‰

的差值递减, 可以用来确定食物网结构或生物的营养级(徐军等, 2010)。

营养级(Trophic level, TL), 是指某一种生物在生态系统的食物链中所处的营养层次(张波等, 2004)。海洋生态系统十分复杂, 具有多层次的营养级结构。了解各种海洋生物尤其是鱼类的营养级及其食性是现代海洋生物学的基础目标之一(蔡德陵等, 2005)。计算营养级和食性的传统方法为胃含物分析法, 即利

* 国家自然科学基金青年科学基金项目(41606195)和国家重点基础研究发展计划项目(2015CB453303)共同资助 [This work was supported by National Science Foundation for Young Scientists of China (41606195), and National Key Basic Research Development Program (2015CB453303)]. 白怀宇, E-mail: xuehaiyouwo@163.com

① 通讯作者: 黄凌风, 教授, E-mail: huanglf@xmu.edu.cn; 孙耀, 研究员, E-mail: sunyao@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2019-10-25, 收修改稿日期: 2020-02-22

用某一种鱼类消化道内未消化的饵料生物的物种组成及数量确定其在食物网中的位置和食性(纪炜炜, 2011)。而稳定同位素能反映生物体一段时间内对食物的吸收代谢情况, 具有检测灵敏度高、不受时间和空间限制等特点(王玉堃, 2015)。蔡德陵等(2005)通过对黄、东海生态系统进行长期研究, 基于大量渔业资源调查数据, 利用氮稳定同位素比值($\delta^{15}\text{N}$), 以紫贻贝(*Mytilus edulis*)作为基准生物, 总结出一个适应于黄、东海鱼类的营养级计算公式。纪炜炜等(2011)利用碳稳定同位素比值($\delta^{13}\text{C}$)计算底层饵料贡献比来确定鱼类的食性, 将其分为 3 大类: 浮游动物食性、底栖动物食性和混合食性。

在过去几十年里, 相关学者对黄海和东海渔业资源的调查和研究从未间断(张波等, 2004; 李忠义等, 2009)。本研究在对 2011 年后捕获的黄海和东海北部 36 种海洋鱼类进行碳、氮稳定同位素测定的基础上, 分析其营养级及食性, 并与以往的研究进行对比, 拟解决以下问题: 1) 黄海和东海北部主要鱼类的营养级在 2011 年后是否发生改变; 2) 黄海和东海北部主要鱼类的食性是否发生变化。

1 材料与方法

1.1 鱼类样品的采集和处理

实验鱼类为 2011~2014 年间中国水产科学研究院黄海水产研究所“北斗”号渔业科学调查船于黄海和东海北部(30°~39°N, 120.5°~126°E)采集的 36 种鱼类。采样航次分别为 2011 年秋季航次(10~11 月)和 2013、2014 年夏季航次(7~8 月)。将鱼冷冻带回实验室后, 用解剖刀去除鱼鳞及鱼皮等, 取适量背部肌肉, 置于 60℃ 恒温鼓风干燥箱中烘干 48 h, 之后使用玛瑙研钵将肌肉组织研磨成细粉末备用。

1.2 稳定同位素检测

实验样品的稳定同位素分析在中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所农业环境稳定同位素实验室进行, 使用 Isoprime-100 稳定同位素质谱仪(德国 Elementar 公司)进行测定, 碳或氮的稳定同位素比值以国际通用的 δ 值表示, 其定义为:

$$\delta(\text{‰}) = [(R_{\text{样品}} - R_{\text{标准}}) / R_{\text{标准}}] \times 1000$$

式中, R 为所测同位素的比率, 为 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$, 碳、氮同位素比值以国际通用标准物 PDB 和大气氮(N_2)作为标准值。每种鱼取 3 个个体的样品进行测定。实验中每 5 个样品加测 1 个标准品, 每 10 个样品中随机选取 1 个样品进行 2~3 次重复测定, $\delta^{13}\text{C}$ 值的

分析精度为 $\pm 0.1\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 值的分析精度为 $\pm 0.2\text{‰}$ 。

1.3 鱼类营养级计算

根据蔡德陵等(2005)的研究结果, 将 $\delta^{15}\text{N}$ 用于计算黄、东海鱼类的营养级, 其公式如下:

$$\text{TL} = (\delta^{15}\text{N}_{\text{样品}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{基准}}) / \Delta\delta^{15}\text{N} + 1$$

式中, $\delta^{15}\text{N}_{\text{样品}}$ 为所测样品的氮同位素比值。营养级的氮同位素富集值 $\Delta\delta^{15}\text{N} = 2.5$ 及基准值 $\delta^{15}\text{N}_{\text{基准}} = 6.05\text{‰}$ 均采用蔡德陵等(2005)的结果, 其研究中的基准生物为紫贻贝。本研究未额外测定基准值。

1.4 鱼类食性测定

参考纪炜炜等(2013)的研究, 通过计算底层饵料贡献比测定某种鱼类的食性, 其公式为:

$$\text{底层饵料贡献比(Bp)} = (\delta^{13}\text{C}_C - \delta^{13}\text{C}_P) / (\delta^{13}\text{C}_B - \delta^{13}\text{C}_P)$$

式中, $\delta^{13}\text{C}_C$ 、 $\delta^{13}\text{C}_P$ 和 $\delta^{13}\text{C}_B$ 分别代表消费者、浮游生物饵料和底层生物饵料的碳同位素平均值, 该公式假设营养级之间碳稳定同位素富集度为 0 (Vander Zander *et al*, 2002)。

根据底层饵料贡献比(Bp)可将水生生物的摄食生态类型划分为 3 大类: Bp < 0.25, 为浮游生物食性; Bp = 0.25~0.75, 为混合食性; Bp > 0.75, 为底栖生物食性。此外, 当 Bp < 0 时, 为完全意义上的浮游生物食性; Bp > 1, 则为完全意义上的底栖生物食性(Vander Zander *et al*, 2002; Sherwood *et al*, 2005; 李忠义等, 2009; 纪炜炜, 2011)。

通过查阅以往的研究结果, 确定黄海和东海北部浮游生物饵料和底层生物饵料的的优势类群及其碳同位素平均值。其中, 浮游生物饵料定义为粒径大于 1000 μm 的浮游动物, 底层生物饵料定义为凹管鞭虾(*Solenocera koelbeli*)、哈氏仿对虾(*Parapenaeopsis hardwickii*)、鹰爪虾(*Trachypenaeu scurvirostris*)和日本螯(*Charybdis japonica*)等底栖无脊椎动物; 浮游生物饵料的碳同位素平均值取 -22.09‰ , 底层生物饵料的碳同位素平均值取 -17.19‰ (薛莹, 2005; 李忠义, 2006)。

1.5 数据处理

本研究对鱼类样本的碳、氮稳定同位素进行统计, 并计算出营养级和食性结果, 与以往研究中黄海及东海北部鱼类的营养级和食性分析结果进行对比, 数据处理软件为 Excel 2013。

2 结果

2.1 稳定同位素测定结果

对于研究中测定的 36 种鱼类, 样品中 $\delta^{13}\text{C}$ 的范

围为-15.40‰~-24.18‰,总跨度为8.78‰,平均值为(-18.60±2.24)‰; $\delta^{15}\text{N}$ 的范围为10.42‰~14.39‰,总跨度为3.97‰,平均值为(12.23±0.92)‰。稳定同位素测定结果如图1所示。

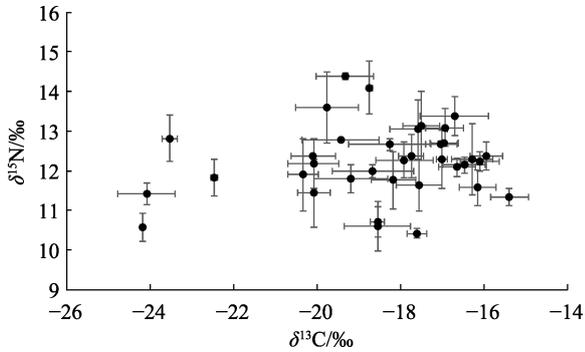


图1 36种海洋鱼类的碳、氮稳定同位素比值(平均值±标准差)

Fig. 1 $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of 36 species of marine fishes (Mean±SD)

2.2 鱼类营养级分析结果

根据实验测定的 $\delta^{15}\text{N}$ 计算得到本研究中的36种海洋鱼类的营养级,结果如表1所示,其营养级范围为2.75~4.34,总跨度为1.59,平均值为3.47。其中,

鲢(*Miichthys miiuy*)的营养级最低,黄姑鱼(*Nibea albiflora*)的营养级最高。

2.3 鱼类底层饵料贡献比和食性测定结果

计算获得的底层饵料贡献比(Bp)值,其范围为-0.43~1.37,总跨度为1.80,其中,斑鱚(*Konosirus punctatus*)的Bp值最小,黑姑鱼(*Atrobucca nibe*)的Bp值最大。根据底层饵料贡献比值可判定,本研究分析的36种海洋鱼类中,有4种为完全浮游生物食性,8种为底栖生物食性(非完全意义上的),混合食性为12种,完全底栖生物食性为12种(表2)。本研究未见其他食性的鱼类。

2.4 营养级分组的食性统计结果

参考张波等(2015)的研究,将本研究中的36种海洋鱼类依据营养级不同分为3组,分别为低营养级组(TL<3.50)、中营养级组(TL=3.5~4)和高营养级组(TL>4),并对不同食性的鱼种数进行统计(图2)发现,中、低营养级组的鱼类占绝大多数,高营养级组的鱼类所占比例较少(8.33%),且都是混合食性。中营养级组不同食性的鱼种数呈现明显的梯度变化,其中有一半为完全底栖食性。低营养级组所占比例较大(52.78%),以混合食性和完全底栖食性为主。

表1 黄海及东海北部36种海洋鱼类营养级谱及对比

Tab. 1 Trophic levels of 36 marine fishes in Yellow Sea and northern East China Sea

鱼的种类 Fish species	氮同位素法 Analysis of $\delta^{15}\text{N}$		胃含物分析法 Analysis of stomach content		
	本研究 This study	蔡德陵等 (2005)	邓景耀等 (1986)	韦晟等 (1992)	张波等 (2004)
鲢 <i>Miichthys miiuy</i>	2.75	3.58	3.40	3.40	4.34
斑鱚 <i>Konosirus punctatus</i>	2.81	-	-	2.00	3.22
银鲳 <i>Pampus argenteus</i>	2.82	2.48	-	2.20	3.12
绿鳍鱼 <i>Chelidonichthys kumu</i>	2.86	2.35	-	2.80	4.10
黑姑鱼 <i>Atrobucca nibe</i>	3.11	-	-	-	-
玉筋鱼 <i>Ammodytes personatus</i>	3.14	2.55	-	2.30	-
日本鲭 <i>Scomber japonicus</i>	3.15	-	-	-	-
鳓 <i>Ilisha elongata</i>	3.21	-	-	-	-
褐牙鲈 <i>Paralichthys olivaceus</i>	3.23	-	-	-	-
黄鲫 <i>Setipinna taty</i>	3.28	2.99	2.40	2.20	3.22
小黄鱼 <i>Larimichthys polyactis</i>	3.30	2.70	3.10	2.70	3.7
棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>	3.31	1.91	2.70	2.50	3.7
长绵鳎 <i>Zoarces elongatus</i>	3.34	2.82	2.40	2.40	-
白姑鱼 <i>Argyrosomus argentatus</i>	3.38	3.38	3.20	2.90	3.81
银色突吻鳗 <i>Gnathophis nystromi</i>	3.42	-	-	-	-
刺鲳 <i>Psenopsis anomala</i>	3.44	-	-	-	4.03

续表 1

鱼的种类 Fish species	氮同位素法 Analysis of $\delta^{15}\text{N}$		胃含物分析法 Analysis of stomach content		
	本研究 This study	蔡德陵等 (2005)	邓景耀等 (1986)	韦晟等 (1992)	张波等 (2004)
蓝点马鲛 <i>Scomberomorus niphonius</i>	3.45	3.62	3.90	3.80	3.89
龙头鱼 <i>Harpadon nehereus</i>	3.47	2.60	-	-	3.55
长蛇鲻 <i>Saurida elongate</i>	3.49	3.49	3.80	3.80	-
多齿蛇鲻 <i>Saurida tumbil</i>	3.50	-	3.45	-	-
竹荚鱼 <i>Trachurus trachurus</i>	3.50	3.02	-	-	3.80
高眼鲷 <i>Cleisthenes herzensteini</i>	3.53	3.30	3.30	-	4.20
尖嘴扁颌针鱼 <i>Ablennes anastomella</i>	3.53	-	-	3.80	-
皮氏叫姑鱼 <i>Johnius belengerii</i>	3.53	3.38	3.30	-	-
宽体舌鳎 <i>Cynoglossus robustus</i>	3.65	2.46	-	-	-
带鱼 <i>Trichiurus coxii</i>	3.65	2.82	-	3.40	3.81
真鲷 <i>Pagrosomus major</i>	3.66	-	-	2.90	4.40
大泷六线鱼 <i>Hexagrammos otakii</i>	3.69	-	3.00	-	-
太平洋鲱 <i>Clupea pallasii</i>	3.70	-	-	-	-
许氏平鲉 <i>Sebastes schlegelii</i>	3.80	-	-	-	-
多鳞鱧 <i>Sillago sihama</i>	3.82	-	-	2.40	-
无斑圆颌针鱼 <i>Tylosurus leiurus</i>	3.83	-	-	-	-
鲷 <i>Platycephalus indicus</i>	3.93	-	-	3.00	-
矛尾复鰂虎鱼 <i>Synechogobius hasta</i>	4.02	3.24	3.00	3.00	-
大头鳕 <i>Gadus macrocephalus</i>	4.22	2.53	-	3.50	4.50
黄姑鱼 <i>Nibea albiflora</i>	4.34	-	-	3.00	3.93

注：“-”表示未得到相关数据，下同

Note:“-”: Data unavailable. The same as below

表 2 黄海和东海北部 36 种海洋鱼类的食性测定结果及对比
Tab.2 Feeding characters of 36 marine fishes in Yellow Sea and northern East China Sea

鱼的种类 Fish species	Bp 值 Bp value	生态摄食类型 Feeding characters			
		本研究 This study	张波等 (2004)	李忠义等 (2009)	纪炜炜等 (2011)
斑鲷 <i>Konosirus punctatus</i>	-0.43	完全浮游生物食性	底栖动物食性	-	-
玉筋鱼 <i>Ammodytes personatus</i>	-0.41	完全浮游生物食性	-	-	-
太平洋鲱 <i>Clupea pallasii</i>	-0.30	完全浮游生物食性	-	-	-
棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>	-0.08	完全浮游生物食性	浮游动物食性	-	-
长绵鳎 <i>Zoarces elongatus</i>	0.36	混合食性	-	-	-
高眼鲷 <i>Cleisthenes herzensteini</i>	0.41	混合食性	底栖、游泳动物食性	-	-
蓝点马鲛 <i>Scomberomorus niphonius</i>	0.41	混合食性	浮游、底栖和游泳动物食性	-	-
日本鲭 <i>Scomber japonicus</i>	0.41	混合食性	-	-	-
矛尾复鰂虎鱼 <i>Synechogobius hasta</i>	0.47	混合食性	-	混合食性	-
大泷六线鱼 <i>Hexagrammos otakii</i>	0.54	混合食性	-	浮游生物食性	-
黄姑鱼 <i>Nibea albiflora</i>	0.56	混合食性	-	完全底栖生物食性	底栖生物食性
小黄鱼 <i>Larimichthys polyactis</i>	0.59	混合食性	浮游、底栖和游泳动物食性	混合食性	混合食性
大头鳕 <i>Gadus macrocephalus</i>	0.68	混合食性	-	-	-

续表 2

鱼的种类 Fish species	Bp 值 Bp value	生态摄食类型 Feeding characters			
		本研究 This study	张波等 (2004)	李忠义等 (2009)	纪炜炜等 (2011)
白姑鱼 <i>Argyrosomus argentatus</i>	0.70	混合食性	底栖、游泳动物食性	浮游生物食性	底栖生物食性
绿鳍鱼 <i>Chelidonichthys kumu</i>	0.72	混合食性	底栖动物食性	-	混合食性
银鲳 <i>Pampus argenteus</i>	0.72	混合食性	浮游底栖动物食性	混合食性	混合食性
宽体舌鳎 <i>Cynoglossus robustus</i>	0.78	底栖生物食性	-	-	-
黄鲫 <i>Setipinna taty</i>	0.80	底栖生物食性	浮游动物食性	混合食性	混合或浮游生物食性
长蛇鲻 <i>Saurida elongate</i>	0.85	底栖生物食性	-	浮游生物食性	-
尖嘴扁颌针鱼 <i>Ablennes anastomella</i>	0.88	底栖生物食性	-	-	-
鲹 <i>Miichthys miiuy</i>	0.91	底栖生物食性	-	完全底栖生物食性	-
许氏平鲉 <i>Sebastes schlegelii</i>	0.92	底栖生物食性	-	-	-
褐牙鲷 <i>Paralichthys olivaceus</i>	0.92	底栖生物食性	-	-	-
无斑圆颌针鱼 <i>Tylosurus leiurus</i>	0.94	底栖生物食性	-	-	-
带鱼 <i>Trichiurus coxii</i>	1.03	完全底栖生物食性	-	-	-
多齿蛇鲻 <i>Saurida tumbil</i>	1.03	完全底栖生物食性	-	-	-
真鲷 <i>Pagrosomus major</i>	1.05	完全底栖生物食性	游泳动物食性	-	-
多鳞鱧 <i>Sillago sihama</i>	1.05	完全底栖生物食性	-	-	-
鲷 <i>Platycephalus indicus</i>	1.10	完全底栖生物食性	-	-	-
银色突吻鳗 <i>Gnathophis nystromi</i>	1.11	完全底栖生物食性	-	-	-
刺鲳 <i>Psenopsis anomala</i>	1.14	完全底栖生物食性	游泳动物食性	-	底栖生物食性
竹荚鱼 <i>Trachurus trachurus</i>	1.19	完全底栖生物食性	浮游、底栖和游泳动物食性	底栖或浮游生物食性	-
鳎 <i>Ilisha elongata</i>	1.21	完全底栖生物食性	-	-	-
龙头鱼 <i>Harpadon nehereus</i>	1.22	完全底栖生物食性	游泳动物食性	混合食性	浮游生物食性
皮氏叫姑鱼 <i>Johnius belengerii</i>	1.25	完全底栖生物食性	-	-	底栖生物食性
黑姑鱼 <i>Atrubucca nibe</i>	1.37	完全底栖生物食性	-	-	-

3 讨论

3.1 碳、氮稳定同位素比值分析

海洋鱼类体内碳、氮稳定同位素含量受其代谢活动等多方面的影响,同时,不同鱼类因其生活史和摄食偏好等的不同,也可能导致它们的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 含量相差较大(图 1)。在本研究 36 种海洋鱼类中,共有 19 种与蔡德陵等(2005)在黄海和东海进行的海洋生

物稳定同位素研究的种类相同。整体研究结果与之相比, $\delta^{13}\text{C}$ 的总跨度相差较小(8.78‰ vs 7.04‰),而 $\delta^{15}\text{N}$ 的总跨度相差较大(3.97‰ vs 7.17‰)。考虑除个体差异和种群特异性之外,2 个研究在采样时不能保证同种鱼处在相同的生长阶段(如幼鱼或成鱼),因此,其稳定同位素的分析结果也会不相同。

此外,研究表明,在同一生态系统中,如果 2 个物种间的碳稳定同位素差异小于 0.60‰ 或大于 1.50‰,便可认为这 2 个物种间不存在捕食关系。因

为对于前一种情况, 它们可能处于同一个营养级上; 而对于后一种, 这 2 个物种之间至少还存在 1 个营养级(王玉堃, 2015)。由此, 本研究中的 36 种海洋鱼类, $\delta^{13}\text{C}$ 总跨度为 8.78‰, 应存在多个营养层次。

对于同一种鱼类的稳定同位素比值, 其或因在不同类型的海区, 饵料种类和丰富度不同而产生差异。张博伦等(2019)研究了天津海域某人工鱼礁区的食物网结构, 对于 2012 年建成的鱼礁区, 其许氏平鲈的 $\delta^{13}\text{C}$ (-17.19‰) 与本研究(-17.58‰)相差较小, 但 $\delta^{15}\text{N}$ (14.30‰) 与本研究(13.04‰)相差较大。这或许是因为人工鱼礁区比本研究中的开阔海域饵料更丰富。

本研究中, 不同鱼种的碳、氮稳定同位素几乎无相关性(图 1), 这或许是由于其营养级跨度较大导致。而对于同一种鱼类的稳定同位素分析, Pethybridge 等(2015)研究发现, 长鳍金枪鱼(*Thunnus alalunga*)肌肉组织中碳、氮稳定同位素具有很好的相关性。陶雅晋等(2017)利用稳定同位素技术结合胃含物分析法研究南海黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacores*)的摄食习性。他们的研究成果为今后利用稳定同位素分析法深入研究某一种海洋鱼类, 尤其是经济鱼种提供了思路。

3.2 海洋鱼类的营养级和食性变动

对于水域生态系统生物营养级和食性的分析测定最早采用胃含物分析法。这种方法比较直观、操作性强, 但对样品的需求量大, 也需要研究者具有娴熟的生物种类识别能力, 且容易存在偶然误差(生物偶食性和饵料难消化吸收等情况)。相对而言, 稳定同位素分析法需要的样品量较小, 高效、准确(王玉堃, 2015)。

本研究查阅以往调查数据, 包括邓景耀等(1986)对渤海鱼类的研究, 韦晟等(1992)对黄海鱼类的研究以及张波等(2004)对东海和黄海鱼类的研究。通过对比发现, 不同年代、不同海域的同种鱼类, 其营养级测定结果存在一定的偏差。同时, 张波等(2004)研究发现, 海洋鱼类的平均营养级随年代变化有下降的趋势。以鲈为例, 本研究中其营养级与张波等(2004)和蔡德陵等(2005)的研究相比, 分别下降了 1.59 和 0.83 个营养级。这可能与本研究中所采集的鲈未生长到成鱼阶段有关。此外, 本研究结果与 Pauly 等(1998)提出的捕捞能降低海洋食物网营养级的观点相吻合, 即在高强度的捕捞影响下, 海洋生态系统中营养级较高的捕食者(通常是成年个体较大、经济价值较高的种类)会持续减少, 从而导致渔获物的整体组成向个体较小、营养级较低、经济价值较低的种类转变(纪炜炜, 2011; 王玉堃, 2015)。

影响鱼类食性的因素有很多, 其中饵料生物的种类

型是主要因素, 栖息环境也在一定程度上影响其食性和摄食量(李忠义等, 2009)。本研究通过与以往学者对黄海和东海北部鱼类食性的研究对比发现, 少数种类在近 10 年中, 其食性几乎没有变化, 如小黄鱼、银鲳等(表 2)。其他种类的食性随年代和海域的不同而略有偏差, 如白姑鱼、龙头鱼等, 考虑到同一种鱼在不同生长阶段其食性会发生改变(张波等, 2016), 而在调查取样时不可能确保所有样本都取到成年个体, 从而导致出现这种结果。

营养级分组的食性统计结果(图 2)同以往的研究(张波等, 2004; 李忠义等, 2009)相比, 黄海和东海北部的主要鱼类有向较低营养级转变的趋势, 同时, 中、高营养级组的鱼类以混合食性和完全底栖食性为主, 分别占这 2 组种类总数的 29.41% 和 41.18%。这种情况, 一方面可能是由于捕捞压力使海洋中饵料生物的种类和数量减少, 迫使某些海洋鱼类改变了食性范围, 由单一食性转变为混合食性; 另一方面, 中、高营养级的部分种类大多以“伏击”的方式捕食其他鱼类, 所以会选择较隐蔽的水底生活, 促使其食性为完全底栖, 例如, Henderson 等(2014)对大西洋牙鲆(*Paralichthys dentatus*)的研究就说明了这一点。

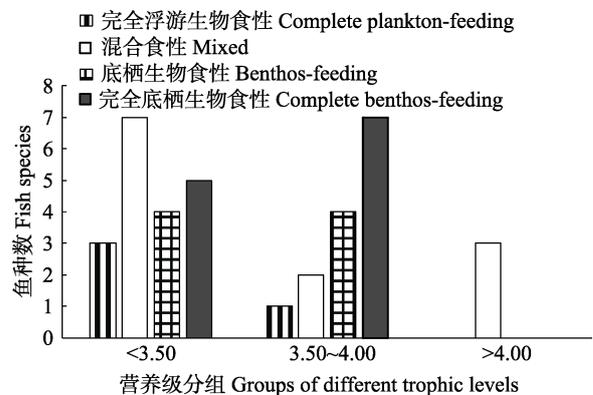


图 2 本研究中不同营养级分组的鱼类食性种类数
Fig.2 Fish species of feeding character in different trophic levels in this study

有学者提出“海洋营养级指数”的概念, 即海洋渔获物的平均营养级, 可反映渔获物及其营养层次的变化趋势。通过近几十年对我国黄海和东海海洋鱼类营养级的研究, 杜建国等(2014)发现, 海洋营养级指数有下降的趋势, 说明我国的海洋渔获物正从高营养级、高经济价值的鱼类向低营养级、低经济价值的鱼类转变。同时, 本研究和以往的研究对比发现, 部分鱼种的营养级发生了较大改变。除了强大的捕捞压力外, 鱼类生境及栖息地的破坏也是导致其营养级变动的一大因素(张波等, 2004)。

参 考 文 献

- Cai DL, Li HY, Tang QS, *et al.* The establishment of continuous trophic levels in the food web of ecosystem of Yellow Sea and East China Sea: The results from analysis of carbon and nitrogen stable isotopes. *Scientia Sinica Vitae*, 2005, 35(2): 123–130 [蔡德陵, 李红燕, 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. *中国科学 C 辑: 生命科学*, 2005, 35(2): 123–130]
- Deng JY, Meng TX, Ren SM. Food web of fishes in Bohai Sea. *Acta Ecologica Sinica*, 1986, 6(4): 356–364 [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]
- Du JG, Ye GQ, Chen B, *et al.* Changes in the marine trophic index of Chinese marine area. *Biodiversity Science*, 2014, 22(4): 532–538 [杜建国, 叶观琼, 陈彬, 等. 中国海域海洋生物的营养级指数变化特征. *生物多样性*, 2014, 22(4): 532–538]
- Henderson MJ, Fabrizio MC, Lucy JA. Movement patterns of summer flounder near an artificial reef: Effects of fish size and environmental cues. *Fisheries Research*, 2014, 153: 1–8
- Ji WW, Chen XZ, Jiang YZ, *et al.* Stable isotope analysis of some representative nektonic organisms in the central and northern part of East China Sea. *Marine Fisheries*, 2011, 33(3): 241–250 [纪炜炜, 陈雪忠, 姜亚洲, 等. 东海中北部游泳动物稳定碳氮同位素研究. *海洋渔业*, 2011, 33(3): 241–250]
- Ji WW, Jiang YZ, Ruan W, *et al.* Stable isotope analysis on the feeding character of representative fishes during spring in central and northern East China Sea and south Yellow Sea. *Marine Fisheries*, 2013, 35(4): 415–422 [纪炜炜, 姜亚洲, 阮雯, 等. 基于稳定同位素方法分析东海中北部及黄海南部春季主要鱼类的食性特征. *海洋渔业*, 2013, 35(4): 415–422]
- Ji WW. Ecological studies on the food web structures and trophic relationships of northern and central East China Sea using stable carbon and nitrogen isotopes. Doctoral Dissertation of Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of Oceanology), 2011 [纪炜炜. 东海中北部主要游泳动物食物网结构和营养关系初步研究. 中国科学院研究生院(海洋研究所)博士研究生学位论文, 2011]
- Li ZY, Zuo T, Dai FQ, *et al.* Study on feeding habits of organisms from Changjiang Estuary and adjacent Southern Yellow Sea in spring with stable isotope technology. *Journal of Fisheries of China*, 2009, 33(5): 784–789 [李忠义, 左涛, 戴芳群, 等. 长江口及南黄海海域春季生物摄食生态的稳定同位素研究. *水产学报*, 2009, 33(5): 784–789]
- Li ZY. Studies on the feeding ecology of dominant fishes and foodweb structure in the Changjiang Estuary and Southern Yellow Sea with stable isotope. Doctoral Dissertation of Xiamen University, 2006 [李忠义. 应用稳定同位素技术研究长江口及南黄海海域主要鱼类摄食生态和食物网结构. 厦门大学博士研究生学位论文, 2006]
- Ohshimo S, Madigan DJ, Kodama T, *et al.* Isoscapes reveal patterns of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of pelagic forage fish and squid in the Northwest Pacific Ocean. *Progress in Oceanography*, 2019, 175: 124–138
- Pauly D, Christensen V, Dalsgaard J, *et al.* Fishing down marine food webs. *Science*, 1998, 279(5352): 860–863
- Pethybridge HR, Young JW, Kuhnert PM, *et al.* Using stable isotopes of albacore tuna and predictive models to characterize bioregions and examine ecological change in the SW Pacific Ocean. *Progress in Oceanography*, 2015, 134: 293–303
- Sherwood GD, Rose GA. Stable isotope analysis of some representative fish and invertebrates of the Newfoundland and Labrador continental shelf food web. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2005, 63(4): 537–549
- Sun M, Liu XZ, Li YP, *et al.* Trophic level analysis of key species in Liaodong Bay using stable nitrogen isotopes. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2013, 20(1): 190–198 [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. *中国水产科学*, 2013, 20(1): 190–198]
- Tao YJ, Mo M, He XB, *et al.* Feeding habits and ontogenetic diet shifts of yellowfin tuna (*Thunnus albacores*) in the South China Sea. *Progress in Fishery Sciences*, 2017, 38(4): 1–10 [陶雅晋, 莫檬, 何雄波, 等. 南海黄鳍金枪鱼(*Thunnus albacores*)摄食习性及其随生长发育的变化. *渔业科学进展*, 2017, 38(4): 1–10]
- Vander Zanden MJ, Vadeboncoeur Y. Fishes as integrators of benthic and pelagic food webs in lakes. *Ecology*, 2002, 83(8): 2152–2161
- Wang YK. Preliminary studies on the population ecology based on fish otolith microstructure and microchemistry. Doctoral Dissertation of Ocean University of China, 2015 [王玉堃. 耳石微细结构和微化学示踪技术在鱼类种群生态学中的应用. 中国海洋大学博士研究生学位论文, 2015]
- Wei S, Jiang WM. Study on food web of fishes in the Yellow Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1992, 23(2): 182–192 [韦晟, 姜卫民. 黄海鱼类食物网的研究. *海洋与湖沼*, 1992, 23(2): 182–192]
- Xu J, Zhang M, Xie P. Variability of stable nitrogen isotopic baselines and its consequence for trophic modeling. *Journal of Lake Sciences*, 2010, 22(1): 8–20 [徐军, 张敏, 谢平. 氮稳定同位素基准的可变性及对营养级评价的影响. *湖泊科学*, 2010, 22(1): 8–20]
- Xue Y. Studies on the feeding ecology of dominant fishes and food web of fishes in the central and southern Yellow Sea. Doctoral Dissertation of Ocean University of China, 2005 [薛莹. 黄海中南部主要鱼种摄食生态和鱼类食物网研究. 中国海洋大学博士研究生学位论文, 2005]
- Zhang B, Tang QS. Study on trophic level of important resources species at high trophic levels in the Bohai Sea, Yellow Sea

and East China Sea. *Advances in Marine Science*, 2004, 22(4): 393–404 [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. *海洋科学进展*, 2004, 22(4): 393–404]

Zhang B, Wu Q, Jin XS. Interannual variation in the food web of commercially harvested species in Laizhou Bay from 1959 to 2011. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2015, 22(2): 278–287 [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. *中国水产科学*, 2015, 22(2): 278–287]

Zhang B, Yuan W, Dai FQ. Study on feeding ecology of fish

community in Laoshan Bay during summer using stable carbon and nitrogen isotopes. *Journal of Fisheries of China*, 2016, 40(4): 585–594 [张波, 袁伟, 戴芳群. 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. *水产学报*, 2016, 40(4): 585–594]

Zhang BL, Guo B, Yu Y, *et al.* Study of the food-web structure in the Dashentang artificial reef area in Tianjin using a stable isotope technique. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(6): 25–35 [张博伦, 郭彪, 于莹, 等. 基于稳定同位素技术的天津大神堂海域人工鱼礁区食物网结构研究. *渔业科学进展*, 2019, 40(6): 25–35]

(编辑 马瑾艳)

Trophic Levels and Feeding Characters of Marine Fishes in the Yellow Sea and Northern East China Sea Based on Stable Isotope Analysis

BAI Huaiyu¹, WANG Yukun², ZHANG Tingting², HUANG Lingfeng^{1,3①}, SUN Yao^{2,4①}

(1. *College of Environment and Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102*; 2. *Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071*; 3. *Key Laboratory of the Ministry of Education for Coastal and Wetland Ecosystems, Xiamen 361102*; 4. *Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071*)

Abstract This study analyzed the carbon and nitrogen stable isotopes from 36 species of marine fishes in the Yellow Sea and northern East China Sea in 2011–2014. The feeding characters were determined by calculating the benthos proportion (Bp) with the $\delta^{13}\text{C}$ data, and the trophic levels (TLs) were calculated using the $\delta^{15}\text{N}$ data. The results showed that the trophic levels of the fishes ranged from 2.75 to 4.34 (mean 3.47). Four of the 36 species were completely plankton-feeding, and eight of them were benthos-feeding. The number of mixed feeding and complete benthos-feeding species was 12. Most of the fish species (91.67%) belonged to the middle (TL=3.5~4) and low (TL<3.5) trophic levels. However, the number of high trophic level (TL>4) species was only 3, and all were mixed feeding. In contrast to the TL research results of 1986, 1992, and 2004, the authors of this paper found that the trophic levels of some species had changed slightly in recent years. For example, the TL of *Scomberomorus niphonius* had decreased to varying degrees, while that of *Setipinna taty* had increased to a certain extent. The feeding character results were compared to those of 2004, 2009, and 2011. It showed that the feeding character of some fishes, such as *Argyrosomus argentatus*, had changed significantly. That of others, such as *Larimichthys polyactis*, had not changed significantly.

Key words Carbon and nitrogen stable isotope; Trophic level; Feeding character

① Corresponding author: HUANG Lingfeng, E-mail: huanglf@xmu.edu.cn; SUN Yao, E-mail: sunyao@ysfri.ac.cn