

张硕, 高世科, 张虎, 等. 海州湾海洋牧场拖网渔获物营养级分析[J]. 广东海洋大学学报, 2020, 40 (4): 132-138.

海州湾海洋牧场拖网渔获物营养级分析

张 硕¹, 高世科¹, 张 虎², 于雯雯², 吴立珍³, 路吉坤⁴, 伏光辉⁴

(1. 上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306; 2. 江苏省海洋水产研究所, 江苏 南通 226007;
3. 连云港市海域使用保护动态管理中心//4. 连云港渔业发展促进中心, 江苏 连云港 222002)

摘要:【目的】分析与对比 2014/2018 年海州湾同种生物的营养级特征。【方法】根据 2018 年 9 月海州湾海洋牧场区渔业资源调查, 应用稳定同位素方法计算主要生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值及营养级, 运用系统聚类分析划分主要营养类群 (Trophic Group, TG)。【结果】鱼类、虾蟹类、头足类和贝类, 营养级范围分别为 2.6~4.1、2.7~3.6、2.9~3.3 和 2.0~3.0。该海域的拖网渔获物可分为 3 大类群: TG1 包括大多数生物类群, 由鱼、虾、蟹类和头足类组成; TG2 主要为高营养级消费者, 包括斑尾刺鰕虎鱼 *Acanthogobius ommaturus* 和四指马鲅 *Eleutheronema tetradactylu*; TG3 为初级消费者。【结论】2018 年海州湾海洋牧场区域同种生物的营养级较 2014 年明显变高, 但也有个别种类的营养级出现不同程度的降低。

关键词:海州湾; 海洋牧场; 稳定同位素; 营养级

中图分类号: S 931.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-9159 (2020) 04-0132-07

doi: 10.3969/j.issn.1673-9159.2020.04.018

Time-scale Variation and Trophic Level Analysis of Stable Isotope of Major Organisms in Haizhou Bay

ZHANG Shuo¹, GAO Shi-ke¹, ZHANG Hu², YU Wen-wen², WU Li-zhen³, LU Ji-kun⁴, FU Guang-hui⁴

(1. College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. Marine Fisheries Research Institute of Jiangsu Province, Nantong 226007, China, 3. Lianyungang sea area use protection dynamic management center//4. Lianyungang fishery development promotion center, Lianyungang 222002, China)

Abstract:【Objective】The trophic level of the same organisms in the same area, 2014 were compared and analyzed. 【Method】According to the fishery resource investigated in Haizhou Bay, 2018, the $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ value and trophic level of major organisms were calculated using stable isotope method. The trophic groups (TGs) were classified by hierarchical cluster analysis. 【Result】Fish, crustacean, cephalopods and shellfish was divided in food web, in which the trophic level ranged from 2.6 to 4.1, 2.7 to 3.6, 2.9 to 3.3 and 2.0 to 3.0, respectively. TG1 (Trophic Group 1) included small-sized fishes, shrimps, crabs and a few cephalopods; TG2 consists mainly of advanced consumers like *Acanthogobius ommaturus*, *Eleutheronema tetradactylu* and primary consumers in

收稿日期: 2019-12-10

基金项目: 江苏省自然科学基金青年基金 (BK20170438); 南通市科技计划项目 (JC2018014)

第一作者: 张硕 (1976—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为近海生态环境修复。E-mail: s-zhang@shou.edu.cn

通信作者: 于雯雯 (1983—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为海洋生态方面。E-mail: jshyyww@163.com

TG3.【Conclusion】The trophic level of same organisms in 2018 was remarkably higher than that in 2014 in Haizhou Bay. However, the trophic level of several species reduced at different degrees.

Key words: Haizhou bay; Sea ranching; Stable isotope; Trophic level

水生生态系统中能量的流动和转化对水环境的物质循环有着极其重要的作用^[1]。为阐释海洋生物间捕食、竞争和共生等关系，构建完整海域食物网、分析食物网结构和功能具有长足意义^[1-3]。传统的胃含物分析法虽能研究生物在一定时期内的食性变化，但耗时费力，随着稳定同位素技术日臻成熟，利用碳（ $\delta^{13}\text{C}$ ）、氮（ $\delta^{15}\text{N}$ ）稳定同位素技术来分析海洋生物的营养功能和结构已成为海洋食物网研究工作中一种重要手段^[5-6]。

在海洋食物网中，碳稳定同位素（ $\delta^{13}\text{C}$ ）主要用于示踪生物的食物来源，还能反映生物所在的海域差异，氮稳定同位素（ $\delta^{15}\text{N}$ ）在生物体内逐层富集，可用于计算营养级^[7]。基于碳氮稳定同位素技术，我国黄东海^[8]、渤海^[9]、胶州湾^[10]、长江口^[11]等沿海海域逐渐建立起食物网基础构架。

海州湾属于半开阔海域，生物资源量丰富，是我国重点保护的港湾之一^[12]。近年来，由于航道建设、过度捕捞等一系列人为活动开展，海州湾海域环境受到不利影响。自2007年起，当地政府开始建设以人工鱼礁为主的海洋牧场，用以生态环境修复和资源利用^[13]。2014年张硕等^[14]和

2017年谢斌等^[15]基于稳定同位素技术定量研究了海州湾海洋牧场营养基础和群落营养结构的季节性变化。

为掌握不同年度海洋牧场生物营养结构变化情况，本研究通过碳、氮稳定同位素方法研究2018年海州湾拖网渔获物营养级的状况，对比分析海州湾海洋牧场2018年与2014年渔获物营养级的差异，以及海洋牧场生态工程建设随时间递增对海域食物网结构的影响，以期为海州湾近海生态环境修复进一步开展提供参考。

1 材料与方法

1.1 样品采集

所有生物样品于2018年9月在海州湾海洋牧场区域内采集得到，站位设置范围在 $34^{\circ}52.849'\text{N}$ – $34^{\circ}56.117'\text{N}$, $119^{\circ}13.641'\text{E}$ – $119^{\circ}33.778'\text{E}$ （图1）。本次调查使用单船底拖网（规格 $125.32\text{ m} \times 59.1\text{ m} \times 36.0\text{ m}$ ），平均拖时为30 min，船速为2.3 kn，共采集28种生物用于稳定同位素分析，其中鱼类13种，头足类3种，虾蟹类8种，贝类共4种。具体数量见表1。

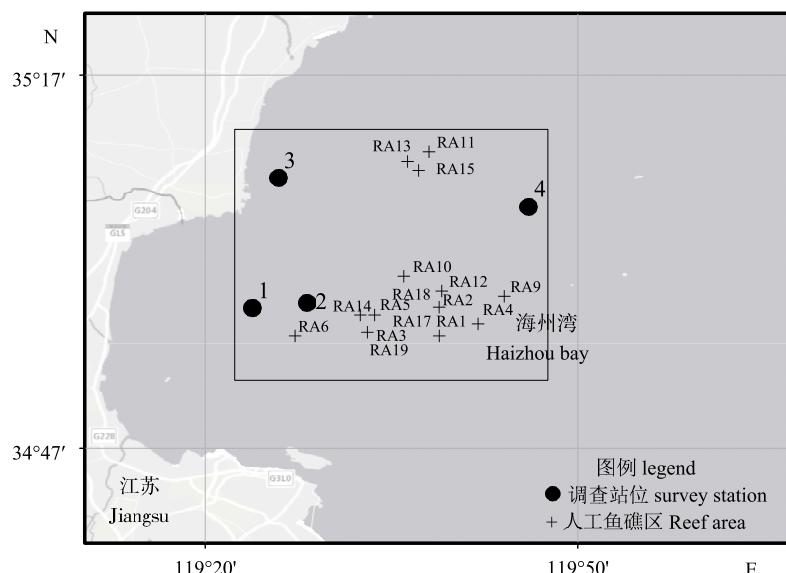


图1 海州湾海洋牧场区域调查站位

Fig. 1 The sampling sites in sea ranching area of Haizhou Bay

表1 海州湾海洋牧场区域拖网渔获物的营养级

Table 1 The trophic level from the major species in sea ranching area of HaiZhou Bay

生物类群 Organisms	种类 Species	体长 Body length/mm	数量 Number/尾	营养级 Trophic level (mean±SD)
鱼类 Fishes	棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>	80~108	5	3.4±0.12
	小黄鱼 <i>Pseudosciaena polyactis</i>	78~112	15	2.9±0.2
	斑尾刺虾虎鱼 <i>Acanthogobius ommaturus</i>	14.2~25	3	4.0±0.3
	鲻 <i>Mugil cephalus</i>	11.4~21.4	6	3.2±0.2
	焦氏舌鳎 <i>Cynoglossus joyneri</i>	15.9~16.3	2	3.6±0.04
	黄卿 <i>Setipinna taty</i>	7.6~13.9	6	3.4±0.1
	矛尾虾虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i>	5.5~9.8	6	3.3±0.38
	鬚缟虾虎鱼 <i>Tridentiger barbatus</i>	5.2~8.9	2	3.4±0.02
	四指马鲅 <i>Eleutheronema tetradactylu</i>	10.3	1	3.9
	赤鼻棱鳀 <i>Thryssa kammalensis</i>	14.5	1	4.1
	带鱼 <i>Trichiurus japonicus</i>	16.5	1	3.2
	白姑鱼 <i>Argyrosomus argentatus</i>		1	3.5
	刀鲚 <i>Coilia macrognathos</i>	15.5	1	3.4
头足类 Cephalopods	短蛸 <i>Octopus ocellatus</i>		1	3.3
	长蛸 <i>Octopus variabilis</i>		1	2.9
	火枪乌贼 <i>Loligo beka</i>		5	3.2±0.25
虾蟹类 Shrimps and Crabs	葛氏长臂虾 <i>Palaemon gravieri</i>		1	2.9
	鞭腕虾 <i>Lysmata risso</i>	2.5~3.1	6	3.3
	三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i>		5	2.89±0.28
	周氏新对虾 <i>Metapenaeus joyneri</i>	19~27	6	3.2±0.26
	哈氏仿对虾 <i>Parapenaeopsis hardwickii</i>	25~81	5	3.0±0.21
	南美白对虾 <i>Penaeus vannamei</i>	34~48	4	2.9±0.22
	刀额新对虾 <i>Metapenaeus ensi</i>		2	2.7±0.17
	口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i>	88~133	5	3.0±0.2
贝类 Shellfish	青蛤 <i>Cyclina sinensis</i>		5	3.0±0.06
	牡蛎 <i>Ostrea gigas thunberg</i>		5	2.9±0.14
	缢蛏 <i>Sinonovacula constricta</i>		10	2.0±0.18

1.2 样品处理及分析

所有生物样品冷冻保存并运输至上海海洋大学摄食生态实验室进行室内分析。根据《海洋调查规范》^[16]进行生物学基础指标测定(表1)，随后取鱼类背部白肌、虾类腹部肌肉、蟹类第一螯足、双壳类闭壳肌、腹足类斧足和头足类胴部。所有样品均在-44.6 °C冷冻干燥后研磨备用。由于脂质含量只对肌肉组织的δ¹³C含量有影响，因此本研究未对肌肉组织进行去脂化处理^[16]。

稳定同位素的分析在上海海洋大学渔业资源可持续开发平台教育部重点实验室分析测试平台完成，使用德国vario元素分析仪和Isoprime100质谱仪测定碳、氮稳定同位素比值，分别以国际通用标准物质PeeDee石灰岩中的碳和大气氮(N₂)作为参考标准，结果以δ¹³C和δ¹⁵N(平均数±标准差)形式来表示，通过以下公式计算：

$$\delta X = (\lambda_{\text{sample}}/\lambda_{\text{standard}} - 1) \times 10^3, \quad (1)$$

式中，X为¹³C或者¹⁵N；λ为¹³C/¹²C或者¹⁵N/¹⁴N的比值。

营养级的确定公式如下：

$$TL = [(\delta^{15}\text{N}_{\text{sample}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}})/\Delta\delta^{15}\text{N}] + 2, \quad (2)$$

式中，TL表示所计算生物的营养位置；δ¹⁵N_{sample}为系统消费者氮稳定同位素比值；δ¹⁵N_{baseline}为该系统基线生物的氮稳定同位素比值，本研究选取缢蛏 *Sinonovacula constricta*^[14]；△δ¹⁵N为1个营养级的富集度(Trophic Enrichment Factor)，本研究沿用Post等△δ¹⁵N的均值3.4‰^[18]。常数项2为1个基线生物的营养级。

1.3 数据处理

通过ArcGis 10.3进行站位图的绘制；基于各类生物的δ¹³C和δ¹⁵N值的平均标准化欧氏距离(Standardised Euclidean distance)，通过SPSS 25.0软件进行组间连接系统聚类分析(Hierarchical Cluster Analysis)；其余数据的处理、统计通过Excel 2019协助完成。

2 结果

2.1 渔获物碳氮稳定同位素比值

2018年调查，海州湾海洋牧场区域拖网渔获物种类的δ¹³C值范围在-21.71‰~-16.20‰，平均值为

$(18.00 \pm 1.19)\text{‰}$; $\delta^{15}\text{N}$ 值范围在 $(7.18\text{‰} \sim 14.44)\text{‰}$, 平均值为 $(11.09 \pm 1.62)\text{‰}$ (图2)。

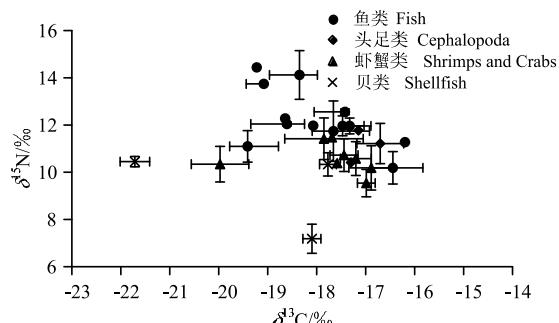


图2 海州湾海洋牧场区域拖网渔获物 (Mean \pm SD) 二维分布
Fig. 2 Two-dimensional distribution map of (Mean \pm SD) of main biological species in sea ranching area of HaiZhou Bay

鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围分别为 $-19.41\text{‰} \sim -16.20\text{‰}$ 和 $10.18\text{‰} \sim 14.44\text{‰}$, 跨度较大, 分别为 3.21‰ 和 4.26‰ ; $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的平均值分别为 $(-17.99 \pm 0.98)\text{‰}$ 和 $(12.26 \pm 1.17)\text{‰}$ 。

头足类 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 $-17.3\text{‰} \sim -16.70\text{‰}$ 和 $10.41\text{‰} \sim 11.77\text{‰}$, $\delta^{13}\text{C}$ 值跨度为 0.60‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 值跨度为 1.36‰ ; $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值分别为 $(-17.05 \pm 0.25)\text{‰}$ 和 $(11.13 \pm 0.56)\text{‰}$ 。

虾蟹类 $\delta^{13}\text{C}$ 范围为 $-19.97\text{‰} \sim -16.89\text{‰}$, 平均值为 $(-17.70 \pm 0.91)\text{‰}$; $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 $9.54\text{‰} \sim 11.48\text{‰}$, 平均值 $(10.58 \pm 0.60)\text{‰}$ 。 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值的跨度分别为 3.08‰ 和 1.94‰ 。

贝类的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围较广, 为 $-21.71\text{‰} \sim -17.77\text{‰}$, 平均值为 $(-18.85 \pm 1.66)\text{‰}$; $\delta^{15}\text{N}$ 值较低, 为 $7.18\text{‰} \sim 10.45\text{‰}$, 平均值为 $(8.85 \pm 1.54)\text{‰}$ 。 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值的跨度都较大, 分别为 3.94‰ 和 3.27‰ 。

2.2 基于聚类分析划分的不同营养类群

通过基于 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的标准化欧氏距离 (Standardised Euclidean distance) 的组间连接系统聚类分析可知, 本次海州湾海洋牧场区域生物群落基本上可分为 3 大营养类群 (Trophic Group) (图3), TG1 为第一营养类群, 主要代表为棘头梅童鱼 *Collichthys lucidus*、小黄鱼 *Pseudosciaena polyactis* 等鱼类、周氏新对虾 *Metapenaeus joyneri*、三疣梭子蟹 *Portunus trituberculatus* 等虾蟹类和火枪乌贼 *Loligo beka*、长蛸 *Octopus variabilis* 等头足类; TG2 主要为高级消费者, 包括斑尾刺鰕虎鱼、四指马鲅等; TG3 为营养级最低的初级消费者。

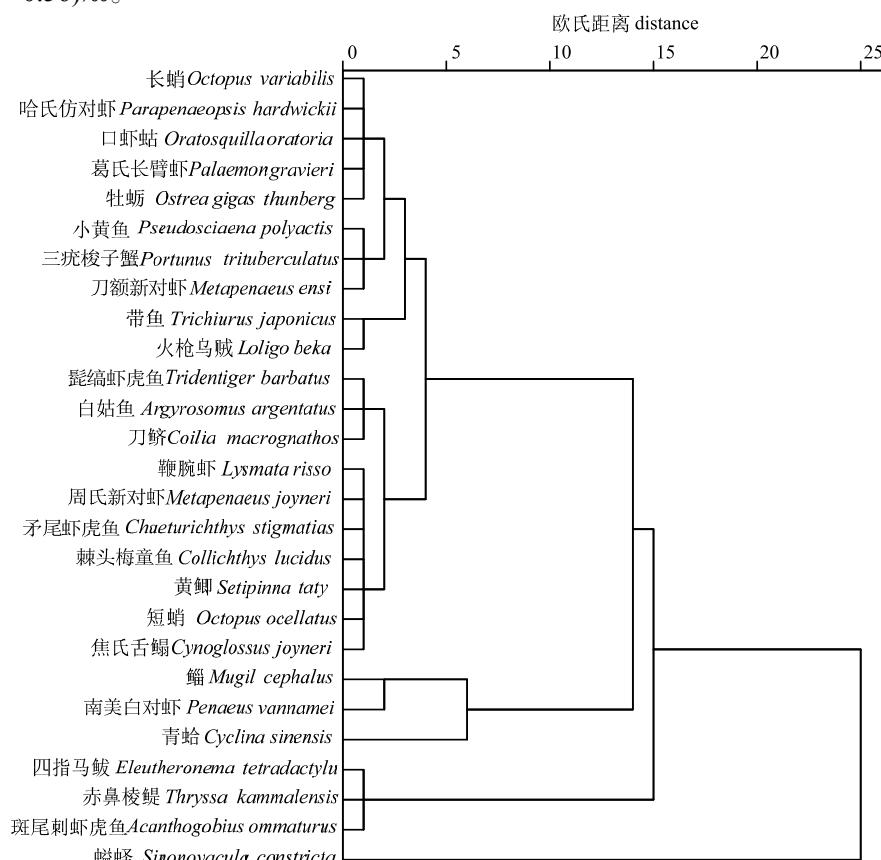


图3 海州湾海洋牧场区域拖网渔获物碳氮稳定同位素比值的聚类分析

Fig. 3 The cluster analysis of carbon and nitrogen stable isotope values from the major marine creatures in sea ranching area of Haizhou Bay

2.3 营养级的确定与年间对比

根据营养级大小将海州湾海洋牧场区域拖网渔获物主要划分为4大类群(图3),鱼类的营养级范围介于2.9(小黄鱼)~4.1(赤鼻棱鳀)之间,其中营养级在3.0以下的只有小黄鱼,有8种鱼类集中在3.0~3.5之间,集中在3.5~4.1之间的鱼类有4种,高于4.0的只有赤鼻棱鳀;虾蟹类营养级在2.7(刀额新对虾*Metapenaeus ensi*)~3.3(鞭腕虾*Lysmata Riso*)范围内变化,营养级在2.5~3.0之间的有5种,在3.0~3.5之间的有3种;头足类

营养级范围为2.9(长蛸)~3.3(短蛸*Octopus ocellatus*);贝类营养级范围为2.0(缢蛏)~3.0(青蛤)。

如表2,2018年海州湾海洋牧场区域相同生物的营养级明显高于2014年,其中,营养级差值最大的是口虾蛄*Oratosquilla oratoria*,为0.6个营养级,其次是棘头梅童鱼和火枪乌贼,小黄鱼、鲻的营养级差为0.4,斑尾刺虾虎鱼和三疣梭子蟹的营养级差为0.3,剩余有53.3%的种类的营养级差集中在0.1~0.2之间,相差不大。

表2 2014年和2018年海州湾海洋牧场区域相同生物的数量和营养级比较

Table 2 Comparison in trophic levels of same marine creatures in sea ranching area of Haizhou Bay between 2014 and 2018

物种 Species	2014年生物数量及营养级 The number and trophic level of creatures in sea ranching area of		2018年生物数量及营养级 The number and trophic level of creatures in sea ranching area of		营养级差 Trophic level difference
	Haizhou bay in 2014	Haizhou bay in 2018	Haizhou bay in 2014	Haizhou bay in 2018	
棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>	2	2.9	5	3.4	0.5
小黄鱼 <i>Pseudosciaena polyactis</i>	4	3.3	15	2.9	-0.4
斑尾刺虾虎鱼 <i>Acanthogobius ommaturus</i>	2	3.7	3	4.0	0.3
鲻 <i>Mugil cephalus</i>	1	2.8	6	3.2	0.4
焦氏舌鳎 <i>Cynoglossus joyneri</i>	4	3.5	2	3.6	0.1
矛尾虾虎鱼 <i>Chaeturichthys stigmatias</i>	1	3.2	6	3.3	0.1
葛氏长臂虾 <i>Palaemon gravieri</i>	3	3.1	1	2.9	-0.2
短蛸 <i>Octopus ocellatus</i>	2	3.2	1	3.3	0.1
长蛸 <i>Octopus variabilis</i>	3	3.0	1	2.9	-0.1
火枪乌贼 <i>Loligo beka</i>	4	3.7	5	3.2	-0.5
鞭腕虾 <i>Lysmata rissos</i>	2	3.1	6	3.3	0.2
三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i>	2	3.2	5	2.9	-0.3
哈氏仿对虾 <i>Parapenaeopsis hardwickii</i>	1	3.2	5	3.0	-0.2
口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i>	11	3.6	5	3.0	-0.6
缢蛏 <i>Sinonovacula constricta</i>	1	2.0	10	2.0	0

3 讨论

3.1 海州湾拖网渔获物的稳定同位素特征

本次海州湾海洋牧场区域调查拖网渔获物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值出现由高到低的阶梯式分布。鱼类在生物样品中所占比例较大,其中虾虎鱼科鱼类属于凶猛肉食性鱼类,其 $\delta^{15}\text{N}$ 值始终保持在较高水平^[19]。棘头梅童鱼、小黄鱼等石首鱼科鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值与长江口海域同一体长规格的鱼类相比,大致相符^[11, 20],本研究赤鼻棱鳀、黄鲫*Setipinnna taty*的 $\delta^{15}\text{N}$ 值变化较大,原因可能与其摄食较大比例底层虾类有关^[21]。焦氏舌鳎*Cynoglossus joyneri*的 $\delta^{15}\text{N}$ 值与其他海域同属舌鳎相比偏小^[8, 10],这与海域差异、调查时间及体长规格等因素有关。

系统聚类分析结果中,TG1中多数鱼类、虾蟹类属于中级消费者范畴,有些虾蟹类和头足类的营养级甚至超过部分鱼类,在其他海域也出现过这种情况^[10],这是由于鱼类捕食营养级较低的生物,导致营养级降低所致^[22],这也是TG1中一些鱼类与虾类被归为一类的原因。鲻在各大海域被视为中型捕食者,在本研究中与南美白对虾同属一个分类,可能原因是鲻的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低,导致其与虾类的食性相近。

3.2 影响海域食物网中营养级确定的主要因素

基线生物和 $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 值是影响食物网中生物确定营养级的关键因素^[23]。基线生物一般选取生长周期长、食性相对稳定的初级消费者、底栖动物或POM等,还需考虑基线生物的时空异质性,且对于生境结构复杂的海域,则可能需要多个基线生物以全面表征食物网结构^[24]。缢蛏作为本研究的基线生物,

其 $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 值与2014年差异较小,且生活史和生长环境比较符合该海域基线生物选取的标准^[14]。

$\Delta\delta^{15}\text{N}$ 值用于定量分析生态系统中生物的营养级。根据 $\delta^{15}\text{N}$ 值在生物体内富集规律的不同,所得到的 $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 值也有所差异。一般而言,选用水生生态系统生物的 $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 值作为研究对象,且排泄物是氨氮的生物比排泄物是尿素的生物的 $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 值小,能够减小误差^[25]。Hussey等^[26]提出, $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 值并非一个定值,使用一定范围内的 $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 值(scaled $\Delta\delta^{15}\text{N}$ framework)能提高食物网构建的精准度,意味着以往食物网结构被简化。本研究沿用Post等^[14]的 $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 值3.4‰,亦是为了与2014年的研究一致,减小计算营养级的误差。

此外,生物营养级还与体长因素密不可分^[27]。Ji等^[20]研究表明,小黄鱼的 $\delta^{15}\text{N}$ 值随着体长增加而增大,蔡德陵等^[8]研究证明带鱼*Trichiurus japonicus*在不同生命阶段的 $\delta^{15}\text{N}$ 值与其体长呈现正相关性;谢斌等^[14]也通过对比鲈鱼*Lateolabrax maculatus*体长与其 $\delta^{15}\text{N}$ 值的关系应证了这一点。这是由于有些生物在生活史中存在食性转变现象,从幼体摄食营养级较低的食物转变为成体摄食营养级较高的食物,导致营养级产生差异^[28]。

3.3 海州湾海洋牧场不同年份间的比较

报道^[29]表明,海洋牧场中人工鱼礁的建设会使海域内的食物网结构发生改变,且随年份迁移,差异变化更加明显。本研究和2014年所设置的站位均在海州湾海洋牧场区域内,且随着时间推移,同种生物的营养级较2014年有明显上升趋势,但也有个别种类营养级发生不同程度降低的现象。

林会洁等^[29]研究表明,口虾姑在人工鱼礁区域比在贝类养殖区、海藻养殖区低了0.1~0.3个营养级,尽管海洋牧场的生态工程建设对海洋生物营养结构起到一定改善作用,丰富了海洋生物的种类和数量,但区域内存在激烈的生物间竞争和明显生态位重叠,即“优胜劣汰”原则,因而导致有些底栖生物种类由于数量增多会因短期内食物来源匮乏而出现营养级降低的现象。这一结论应证了本研究口虾姑营养级降低的可能原因。同时,也能够解释本研究虾蟹类的营养级在2个年份间出现不同程度下降的现象。而火枪乌贼的食性以甲壳类为主,其中口虾蛄、葛氏长臂虾占比为4.7%和1.3%^[30],由于生物饵料组成减少或者消失,致使其强制性改变食性或食源,以更低营养级的饵料为食,因此这可

能是火枪乌贼营养级下降的主要原因。

小黄鱼是主要以鱼类、甲壳类为食的杂食性鱼类,口虾蛄、葛氏长臂虾是其食物之一^[28]。本研究小黄鱼与2014年相比下降了0.4个营养级,在体长规格相差不大的情况下,除考虑可能的食性转变对其营养级的影响,还需进一步分析其潜在碳源影响。谢斌等^[15]研究表明,小黄鱼的潜在碳源以浮游植物为主,而近年来,海洋牧场的建立减少了水体富营养化和赤潮发生率,改善了水环境质量,使得海州湾夏季浮游植物浓度逐年波动幅度较大^[31],导致小黄鱼的潜在碳源出现不可预测的变化,这可能是小黄鱼营养级下降的另一个潜在因素。

4 结语

海洋牧场生态工程建设对食物网结构的影响是多方面的,一方面增加了物种多样性,增大了食物网结构的复杂程度;另一方面,在改善生物生存环境的同时,出现了高营养级生物数量增多、低营养级生物数量减少的现象,以致于部分生物种类的营养级降低。本研究仅从2年份间生物的碳氮稳定同位素值来界定海州湾海洋牧场建设对生态系统的影响,显然不够全面,在将来研究中,可将水环境因素(pH、光照、温度、盐度等)结合生态系统评估系统引入,综合考量海洋牧场建设带来的生态效益,也能为海州湾近海环境保护和渔业资源恢复问题拓展相应的理论参考。

参考文献

- ZADEREEV E S, GULATI R D, CAMACHO A. Biological and ecological features, trophic structure and energy flow in meromictic lakes[M]//Ecology of Meromictic Lakes. Cham: Springer International Publishing, 2017: 61-86.
- BUMPERS P M, ROSEMOND A D, MAERZ J C, et al. Experimental nutrient enrichment of forest streams increases energy flow to predators along greener food-web pathways[J]. Freshwater Biology, 2017, 62(10): 1794-1805.
- BĂNARU D, HARMELIN-VIVIEN M. Trophic links and riverine effects on food webs of pelagic fish of the north-western Black Sea[J]. Marine and Freshwater Research, 2009, 60(6): 529.
- JOHANNSSON O E, LEGGETT M F, RUDSTAM L G, et al. Diet of *Mysis relicta* in Lake Ontario as revealed by stable isotope and gut content analysis[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2001, 58(10):

1975-1986.

- [5] CABANA G, RASMUSSEN J B. Comparison of aquatic food chains using nitrogen isotopes[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1996, 93(20): 10844-10847.
- [6] PRECIADO I, CARTES J E, PUNZÓN A, et al. Food web functioning of the benthopelagic community in a deep-sea seamount based on diet and stable isotope analyses[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2017, 137: 56-68.
- [7] WADA E, TERAZAKI M, KABAYA Y, et al. $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ abundances in the Antarctic Ocean with emphasis on the biogeochemical structure of the food web. *Deep-Sea Res*, 1987, 34: 829-841.
- [8] 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[J]. 中国科学C辑: 生命科学, 2005, 35(2): 123-130.
- [9] QU P, WANG Q X, PANG M, et al. Trophic structure of common marine species in the Bohai Strait, North China Sea, based on carbon and nitrogen stable isotope ratios[J]. Ecological Indicators, 2016, 66: 405-415.
- [10] 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.
- [11] 同光松, 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.
- [12] 张秀英, 钟太洋, 黄贤金, 等. 海州湾生态系统服务价值评估[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 640-649.
- [13] 吴立珍, 吴卫强, 陆伟, 等. 海州湾生态环境修复的探索实践与展望: 江苏省海洋牧场示范区建设[J]. 中国水产, 2012(6): 35-37.
- [14] 张硕, 谢斌, 符小明, 等. 应用稳定同位素技术对海州湾拖网渔获物营养级的研究[J]. 海洋环境科学, 2016, 35(4): 507-511.
- [15] 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.
- [16] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763. 6-2007 海洋调查规范第6部分: 海洋生物调查. 北京: 中国标准出版社, 2007
- [17] SKINNER M M, MARTIN A A, MOORE B C. Is lipid correction necessary in the stable isotope analysis of fish tissues[J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2016, 30(7): 881-889.
- [18] POST D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions[J]. Ecology, 2002, 83(3): 703-718.
- [19] NEVES L M, TEIXEIRA T P, ARAÚJO F G. Structure and dynamics of distinct fish assemblages in three reaches (upper, middle and lower) of an open tropical estuary in Brazil[J]. Marine Ecology, 2011, 32(1): 115-131.
- [20] JI W, CHEN X, JIANG Y, et al. Trophic ecology of small yellow croaker (*Larimichthys polyactis* Bleeker): stable carbon and nitrogen isotope evidence[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2011, 29(5): 1033-1040.
- [21] 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.
- [22] MALEK A J, COLLIE J S, TAYLOR D L. Trophic structure of a coastal fish community determined with diet and stable isotope analyses[J]. Journal of Fish Biology, 2016, 89(3): 1513-1536.
- [23] JUN X U, ZHANG M A, XIE P. Variability of stable nitrogen isotopic baselines and its consequence for trophic modeling[J]. Journal of Lake Sciences, 2010, 22(1): 8-20.
- [24] 贡艺, 陈玲, 李云凯. 海洋生态系统稳定同位素基线的选取[J]. 应用生态学报, 2017, 28(7): 2399-2404.
- [25] CAUT S, ANGULO E, COURCHAMP F. Variation in discrimination factors ($\Delta^{15}\text{N}$ and $\Delta^{13}\text{C}$): the effect of diet isotopic values and applications for diet reconstruction[J]. Journal of Applied Ecology, 2009, 46(2): 443-453.
- [26] HUSSEY N E, MACNEIL M, MCMEANS B C, et al. Rescaling the trophic structure of marine food webs[J]. Ecology Letters, 2014, 17(2): 239-250.
- [27] VILLAMARÍN F, JARDINE T D, BUNN S E, et al. Body size is more important than diet in determining stable-isotope estimates of trophic position in crocodilians[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 2020.
- [28] 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.
- [29] 林会洁, 秦传新, 黎小国, 等. 柘林湾海洋牧场不同功能区食物网结构[J]. 水产学报, 2018, 42(7): 1026-1039.
- [30] 杨纪明. 渤海无脊椎动物的食性和营养级研究[J]. 现代渔业信息, 2001, 16(9): 8-16.
- [31] 李大鹏, 张硕, 石一茜, 等. 海州湾海洋牧场浮游植物群落年际变A F G. Structure and dynamics of distinct fish assemblages in three reaches (upper, middle and lower) of an open tropical estuary in Brazil[J]. Marine Ecology, 2011, 32(1): 115-131.

(责任编辑: 刘岭)