

高世科, 孙文, 张硕. 基于稳定同位素方法的吕泗渔场近岸海域主要生物潜在碳源及营养级分析[J]. 海洋学报, 2021, 43(6): 71–80, doi:10.12284/hyxb2021066

Gao Shike, Sun Wen, Zhang Shuo. The potential carbon source and trophic level analysis of main organisms in coastal water of Lüsü fishing ground, based on carbon and nitrogen stable isotope analysis[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(6): 71–80, doi:10.12284/hyxb2021066

基于稳定同位素方法的吕泗渔场近岸海域主要生物潜在碳源及营养级分析

高世科¹, 孙文¹, 张硕^{1,2*}

(1. 上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306; 2. 长江口水生生物资源监测与保护联合实验室, 上海 201306)

摘要: 基于稳定同位素方法, 对 2018 年吕泗渔场近岸海域夏季主要生物种类的潜在碳源及其营养级进行分析, 利用 IsoSource 模型计算该海域消费者的 3 大碳源 (浮游植物、悬浮颗粒有机物、底质有机物) 贡献值, 并比较叠加潜在碳源影响前后主要生物种类的营养级变化。结果表明, 浮游植物和底质有机物对 37 种主要生物种类的贡献比例分别为 58.7% 和 28.2%, 而悬浮颗粒有机物的贡献较小。因此判定吕泗渔场近岸海域夏季主要生物种类的潜在碳源主要是浮游植物和底质有机物。通过分别叠加 3 大潜在碳源和单一物种作为基准值构建两个营养级谱, 右营养级谱的生物种类营养级范围为 1.74~3.92, 比左营养级谱平均下降 0.19 个营养级, 尽管两个营养级谱的整体趋势走向不变, 但部分鱼类和多数虾类的营养位置发生改变。右营养级谱的基准值随着潜在碳源叠加比例的不同而变化, 能有效反映生物营养级, 更适用于低营养级的虾蟹类。但对于处于中高级消费者位置的鱼类来说, 这种叠加的效果影响不大。

关键词: 稳定同位素; 吕泗渔场; 主要生物; 潜在碳源; 营养级分析

中图分类号: P714⁺.4

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2021)06-0071-10

1 引言

海洋生态系统中的食物网结构研究是生态学研究的一个重要领域, 海洋生物的群落结构和营养级是其不可分割的一部分^[1-3]。传统的生物食性和营养级研究是通过胃含物分析法开展的, 但该方法存在较大局限性, 如工作量较大、耗时较长等^[4]。近年来, 稳定同位素技术的出现, 成为研究海域群落营养结构、鱼类食性特征和探究海洋物种多样性的一种重要手段^[5-8]。碳稳定同位素 ($\delta^{13}\text{C}$) 在生物体内富集度较低, 适用于区分食物来源及海域差异, 而氮稳定同位素 ($\delta^{15}\text{N}$) 在各个消费者营养级之间以大约 3‰ 的富集度增加, 以

此确定生物的营养级。营养级产生差异的原因来自生物的规格大小、基线生物和营养级富集度的选择^[9-10]。比如, 前有学者通过室内模拟生物生长实验得到营养级富集度, 为 3.4‰^[11] 和 2.5‰^[12]; Hussey 等^[13] 提出营养级富集度不是一个定值, 并使用营养级富集度的范围值来确定营养级, 发现传统食物网中消费者的营养级明显偏高。可见, 作为构建食物网的基本前提, 探究消费者营养级间的差异和影响因素是必不可少的。

吕泗渔场处于东、黄海交界处, 是江苏近海八大著名渔场之一, 其鱼类资源和饵料生物丰富, 是海洋生物良好的繁殖场和索饵场。目前, 在渤海^[14]、黄海、东海^[12]、胶州湾^[15] 等海域已有不少关于生物群落

收稿日期: 2020-12-25; 修订日期: 2021-01-25。

基金项目: 江苏海州湾国家海洋牧场示范项目 (D-8005-18-0188)。

作者简介: 高世科 (1994—), 男, 福建省福鼎市人, 博士研究生, 主要研究方向为近海生态连通性。E-mail: Gshike@163.com

* 通信作者: 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

营养结构的研究。然而,基于稳定同位素技术定量研究吕泗渔场近岸海域食物网营养基础和群落营养结构等方面的研究未见报道。以往针对吕泗渔场的调查研究主要集中于水环境质量及渔业资源生态群落方面,但是仅从这些单一层面去分析远远不够,且从近几年来近岸海域的环境恶化及人为过度捕捞现象不断加深来看,补充生物营养级及食物网构建方面的系统研究是十分必要的。

本文目的在于利用碳氮稳定同位素方法研究吕泗渔场近岸海域夏季潜在碳源对主要生物种类的贡献比例,并分析、比较吕泗渔场近岸海域夏季主要生物种类的营养结构特征,以期为今后进一步研究该海域的生态营养动力学提供理论参考,也为近海生态环境修复、生态资源的合理利用提供基础参数和科学论断。

2 材料与方法

2.1 研究区域及样品采集

于2018年9月对江苏省如东吕泗渔场近海海域(32°23.140'~32°59.504'N, 121°17.509'~122°11.161'E)的18个站位进行渔业资源调查(图1),调查海域平均水深为10 m。调查船为功率270 kW左右的单拖渔船,平均拖速为3.64 kn,每站拖网时间约为25 min。使用标准I型浮游生物网采集浮游动物,使用III型浮游生物网采集浮游植物,分别使用底层有翼单囊底拖网(规格长:宽:高为125.32 m:59.1 m:36.0 m)

采集游泳生物,采水器采集2 L水样用于测定悬浮颗粒有机物(Particle Organic Matter, POM),抓斗式采泥器采集底质用于测定底质有机物(Sedimental Organic Matter, SOM),所有样品冰冻保存至室内分析^[16]。

2.2 样品预处理及稳定同位素分析

挑出样品中的杂质,将样品中的浮游动物清养1~2 h空胃后选出优势种,浮游植物先后滤过孔径为100 μm 和20 μm 筛绢以取得规格为20~100 μm 的种类后加蒸馏水,静置后,取上清液抽滤在经过500°C灼烧5 h的Whatman GF/F玻璃纤维滤膜上。水体POM用80目孔径筛绢过滤,再抽滤至经过500°C预灼烧5 h的What-man GF/F膜上。SOM在60°C恒温干燥24 h,研磨后用10%盐酸酸化(去除碳酸盐干扰)^[17],同等条件下再次烘干、研磨,经过孔径为63 μm 的筛绢分筛后的样品待测。

同种生物样品的取样原则,是按照不同站点、不同规格来界定的,并根据《海洋调查规范》^[16]进行生物学基础指标测定(表1),鱼类取背部白肌组织、头足类取胴部、虾类取腹部肌肉组织、蟹类取第一螯足、双壳类取闭壳肌、腹足类取斧足、浮游动植物取整体,所有样品均在-44.6°C冷冻干燥后研磨备用。

稳定同位素分析在自然资源部第三海洋研究所同位素分析实验室进行,使用Vario Isotope Cube-Iso-prime元素分析仪测定碳、氮稳定同位素比值,分别以国际通用的标准物质PeeDee石灰岩中的碳和大气氮作为参考标准,结果以 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 形式来表示,计

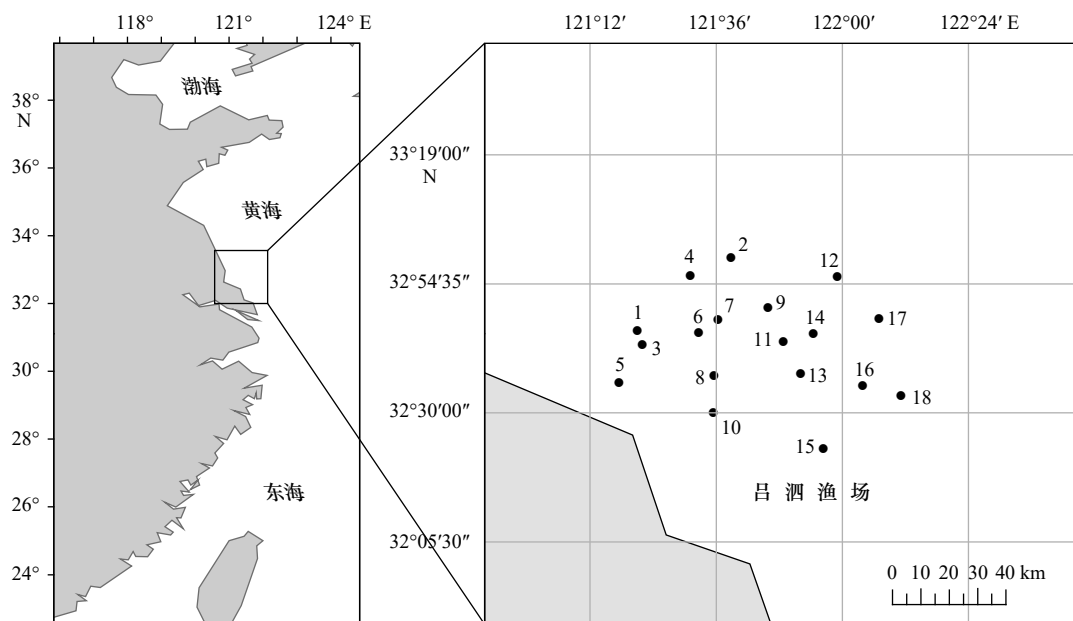


图1 研究区域
Fig. 1 Study area

表1 吕泗渔场近岸海域生物种类、数量、体长范围和 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 $\delta^{15}\text{N}$ 值Table 1 The species number, body length range and $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ value of the samples collected in coastal water of Lüsi fishing ground

	种类	体长范围/mm	数量	$\delta^{13}\text{C}$ 值/‰(平均值±标准差)	$\delta^{15}\text{N}$ 值/‰(平均值±标准差)	
鱼类	小黄鱼 <i>Larimichthys polyactis</i>	54~137	9	-17.72±0.68	8.95±0.6	
	棘头梅童鱼 <i>Collichthys lucidus</i>	100~112	4	-17.4±1.11	10.79±0.58	
	刀鲚 <i>Coilia macrognathos</i>	175~305	6	-17.49±0.9	12.09±0.73	
	凤鲚 <i>Coilia mystus</i>	110~180	4	-17.93±1.08	11.71±1.01	
	黄鲫 <i>Setipinna taty</i>	125~170	4	-16.44±0.31	12.68±0.12	
	鳓鱼 <i>Ilisha elongata</i>	136~160	3	-15.87±0.03	11.2±0.2	
	带鱼 <i>Trichiurus japonicus</i>	359~625	2	-15.88±0.49	13.15±0.17	
	龙头鱼 <i>Harpadon nehereus</i>	195~201	3	-16.06±0.27	11.25±0.72	
	银鲱 <i>Pampus argenteus</i>	104~131	3	-15.82±0.1	12.2±0.48	
	海鳗 <i>Muraenesox cinereus</i>	478~588	3	-15.68±0.13	12.49±0.34	
	鲩鱼 <i>Miichthys miuy</i>	234~320	5	-16.17±0.11	12.29±0.37	
	焦氏舌鳎 <i>Cynoglossus joyneri</i>	142~200	2	-16.2±0.31	11.75±0.03	
	褐牙鲆 <i>Paralichthys olivaceus</i>	85	3	-17.25±0.54	9.75±1.3	
	多鳞鱈 <i>Sillago sihama</i>	176~179	2	-17.69±0.41	14.13±0.13	
	赤鼻棱鯧 <i>Thryssa kammalensis</i>	85~101	4	-19±0.71	13.43±0.69	
	鲻鱼 <i>Mugil cephalus</i>	139~149	2	-16.64±0.32	9.47±0.55	
	皮氏叫姑鱼 <i>Johnius belangerii</i>	87~111	2	-17.87±0.13	11.5±1.49	
	中国花鲈 <i>Lateolabrax maculatus</i>	170	1	-16.22±0	13.13±0	
	褐菖鲉 <i>Sebastes marmoratus</i>	122~148	3	-17.4±0.11	13.79±0.16	
	斑鱧 <i>Konosirus punctatus</i>	160~194	3	-20.49±0.34	10.89±1.04	
	中华小沙丁鱼 <i>Sardinella nympheae</i>	99~103	2	-18.92±0.16	13.25±0.1	
	黑鲷 <i>Acanthopagrus schlegelii</i>	164~169	2	-20.36±2.58	13.6±0.13	
	大黄鱼 <i>Larimichthys crocea</i>	171	1	-16.07±0	12.45±0	
头足动物	火枪乌贼 <i>Loligo beka</i>	126~194	3	-15.79±0.17	12.25±0.73	
甲壳动物	三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i>	90~172	4	-15.29±0.42	11.72±0.44	
	日本螯 <i>Charybdis japonica</i>	61~70	3	-15.62±0.49	10.04±1.96	
	细巧仿对虾 <i>Parapenaeopsis tenella</i>	49~52	3	-16.74±0.43	10.04±0.23	
	日本囊对虾 <i>Marsupenaeus japonicus</i>	106~112	2	-13.92±0.33	9.84±0.33	
	安氏白虾 <i>Exopalaemon annandalei</i>	75~82	3	-19.23±0.32	10.64±0.43	
	哈氏仿对虾 <i>Parapenaeopsis hardwickii</i>	84~110	5	-15.67±0.18	10.03±0.6	
	刀额新对虾 <i>Metapenaeus ensi</i>	74~80	4	-16.37±0.54	10.22±1.02	
	口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i>	125~180	3	-15.99±0.19	11.21±0.8	
	葛氏长臂虾 <i>Palaemon gravieri</i>	60~68	3	-15.81±0.19	10.72±0.57	
	周氏新对虾 <i>Metapenaeus joyneri</i>	90~120	5	-16.64±0.55	10.11±0.18	
	细螯虾 <i>Leptochela gracilis</i>	70~75	2	-15.96±0.22	10.66±0.15	
	软体动物	毛蚶 <i>Scapharca subcrenata</i>	25~29	2	-17.83±0	8.94±1.71
	浮游动物	浮游动物		1	-21.45±0	6.73±0
潜在碳源	浮游植物		11	-24.27±0.92	4.3±1.53	
	悬浮颗粒有机物		12	-23.41±0.75	3.58±0.42	
	底质有机物		11	-20.24±0.89	3.58±1.52	

算公式为

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

$$\delta^{15}\text{N}(\text{‰}) = \left[\left(\frac{{}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}_{\text{sample}}}{{}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}_{\text{air}}} - 1 \right) \right] \times 1000\text{‰}, \quad (2)$$

式中, ${}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{sample}}$ 和 ${}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}_{\text{sample}}$ 是样品中重同位素与轻同位素的比值; ${}^{13}\text{C}/{}^{12}\text{C}_{\text{VPDB}}$ 代表 VPDB (Vienna Pee Dee Belemnite) 标准的 ${}^{13}\text{C}$; ${}^{15}\text{N}/{}^{14}\text{N}_{\text{air}}$ 代表大气 N_2 中的 ${}^{15}\text{N}$ 。根据元素分析仪的精度, 计算结果保留两位小数。

2.3 潜在碳源分析

根据质量守恒原理, 利用 Phillips 和 Gregg^[18] 不断完善编译的 IsoSource 模型来定性分析和计算各个碳源对消费者的食源贡献比例。当食物网中食物来源的数量太多时, IsoSource 模型可以帮助确定消费者食物来源贡献的范围(0~100%), 并提供了每个食源贡献的上限和下限, 每个食源贡献可能的结果都以小的增量(1%~2%)进行检查。最终, 潜在源贡献的频率和范围用直方图表示。其公式及原理如下:

$$\delta j_M = f_A \delta j_A + f_B \delta j_B + f_C \delta j_C, \quad (3)$$

$$\delta k_M = f_A \delta k_A + f_B \delta k_B + f_C \delta k_C, \quad (4)$$

$$1 = f_A + f_B + f_C, \quad (5)$$

式中, j_M 、 k_M 为消费者 M 的两种同位素 j 、 k 的比值; A、B、C 为食物源; f 为食物对消费者的贡献率。

由于本次调查海域离岸距离较远, 且藻类养殖区布满挂笼和挂网, 致使调查船无法通过, 因此未对紫菜等大型藻类进行采样。因此, 以该海域物质基础中的浮游植物、POM 和 SOM 作为食物网中的 3 种潜在碳源, 来分析该海域主要消费者的食性来源贡献比例。

2.4 营养级分析

营养级是海域中重要经济种类的一种衡量指标, 通常, 氮稳定同位素比值被用来确定生物的营养级, 并通过食物链进行富集^[19]。稳定同位素间的分馏容易引起营养级之间的差异, 传统的营养级计算公式为

$$TL = \frac{\delta^{15}\text{N}_{\text{sample}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}}{\Delta\delta^{15}\text{N}} + a, \quad (6)$$

式中, TL 表示所计算生物的营养级; $\delta^{15}\text{N}_{\text{sample}}$ 为系统消费者氮稳定同位素比值; $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 为该系统基线生物的氮稳定同位素比值; $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 为 1 个营养级的富集度; a 代表基线生物的营养级(如草食性种类的桡足类动物是小鲱鱼和凤尾鱼的主要食物来源, 其营养级为 2; 多毛纲食肉动物是马鲛鱼的主要食饵, 其营养级估计为 3)。

本研究采用 Qu 等^[14] 重新编译、矫正过的营养级计算公式, 如下:

$$TL = \frac{\delta^{15}\text{N}_{\text{sample}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}}{\Delta\delta^{15}\text{N}} + 1. \quad (7)$$

营养级计算结果的差异主要来自两个关键参数, $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 和 $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 。 $\Delta\delta^{15}\text{N}$ 确定相邻两个营养水平之间的相对距离, 它随地域和物种而变化^[11, 20-21]。本研究将浮游动物作为基线生物(上述公式 $a=2$), 沿用 3.4‰ 作为营养级富集度^[11]。此外, 为了探究不同基线生物对营养级的影响, 本研究还通过 IsoSource 模型叠加浮游植物、POM、SOM 3 种潜在碳源作为基准值(上述公式 $a=1$), 要说明的是, 此时每个物种对应的基准值是不一样的, 其计算原理如下:

$$\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}} = \delta^{15}\text{N}_1 \times P_1 + \delta^{15}\text{N}_2 \times P_2 + \dots + \delta^{15}\text{N}_n \times P_n, \quad (8)$$

式中, $\delta^{15}\text{N}_n$ 代表不同潜在碳源的食物; P_n 代表所属潜在碳源对消费者所占的比例。

2.5 统计分析

通过 ArcGis 10.3 软件绘制调查海域站位图; 使用 SPSS 25.0 软件完成数据分析; 使用 EXCEL 2019 和 ORIGIN 2018 软件完成数据处理和图表制作。

3 结果

3.1 样品描述

本次吕泗渔场近岸海域调查采集到的生物种类一共 37 种, 以鱼类居多, 达 23 种; 无脊椎动物 14 种, 其中头足类 1 种、虾蟹类 11 种、贝类 1 种, 其余生物种类 1 种(表 1)。

3.2 稳定同位素结果

如图 2, 所有生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值、 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈现明显阶梯分层分布, 最上层是鱼类, 往下是虾蟹类、浮游动物, 最下层是潜在碳源。鱼类 $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围为 $(-20.49 \pm 0.34)\text{‰}$ (斑鰈 *Konosirus punctatus*) ~ $(-15.68 \pm 0.13)\text{‰}$ (海鳗 *Muraenesox cinereus*); $\delta^{15}\text{N}$ 值的范围为 $(8.95 \pm 0.6)\text{‰}$ (小黄鱼 *Larimichthys polyactis*) ~ $(14.13 \pm 0.13)\text{‰}$ (多鳞鱈 *Sillago sihama*)。甲壳动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的范围为 $(-19.23 \pm 0.32)\text{‰}$ (安氏白虾 *Exopalaemon annandalei*) ~ $(-13.92 \pm 0.33)\text{‰}$ (日本囊对虾 *Marsupenaeus japonicus*), $\delta^{15}\text{N}$ 值的范围为 $(9.84 \pm 0.33)\text{‰}$ (日本囊对虾) ~ $(11.72 \pm 0.44)\text{‰}$ (三疣梭子蟹 *Portunus trituberculatus*)。

如表 2, 潜在碳源的 $\delta^{13}\text{C}$ 值从 $(-24.27 \pm 0.92)\text{‰}$ (浮游植物) 到 $(-20.24 \pm 0.89)\text{‰}$ (SOM) 之间变化, 均值为 -22.64‰ , 跨度为 4.03‰ ; 潜在碳源的 $\delta^{15}\text{N}$ 值从 $(3.58 \pm 0.42)\text{‰}$ (POM) 变化到 $(4.3 \pm 1.53)\text{‰}$ (浮游植物), 均值为 3.82‰ , 跨度为 0.72‰ 。

3.3 IsoSource 模型结果

本次调查结果表明(图 3), 浮游植物对所有生物

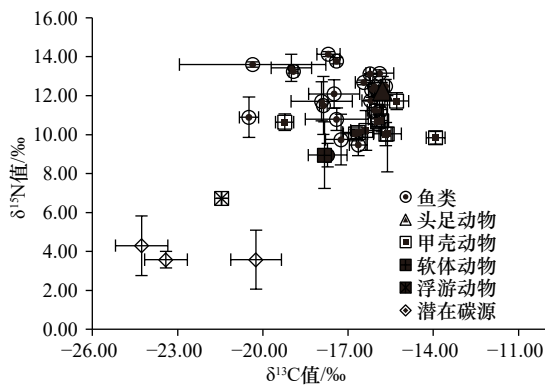


图2 吕泗渔场近岸海域主要生物 $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ (平均值 \pm 标准差)的二维分布

Fig. 2 Two-dimensional distribution of $\delta^{13}\text{C}$ - $\delta^{15}\text{N}$ (mean \pm SD) of main biological species in coastal water of Lüsi fishing ground

表2 潜在碳源 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的值

Table 2 Values of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ for the potential carbon sources

分类	数量	$\delta^{13}\text{C}$ 值/‰	$\delta^{15}\text{N}$ 值/‰
浮游植物	11	-24.27 \pm 0.92	4.3 \pm 1.53
POM	12	-23.41 \pm 0.75	3.58 \pm 0.42
SOM	11	-20.24 \pm 0.89	3.58 \pm 1.52

的碳源贡献范围为1.3%(日本囊对虾)~91.3%(浮游动物),均值为58.7%;POM贡献范围变化较小,对所有生物的碳源贡献范围为0.3%(浮游动物)~25.8%(焦氏舌鳎 *Cynoglossus joyneri*),均值为12.5%;SOM对所有生物的碳源贡献范围为7.2%(安氏白虾)~97%(日本囊对虾),均值为28.2%。因此,判定吕泗渔场近岸海域夏季主要生物的潜在碳源主要是浮游植物和SOM。

根据 IsoSource 软件的分析结果,可将吕泗渔场的主要生物种类划分为3大类群,第1类是以浮游植物为主要碳源贡献的生物种类,包括多鳞鳢、中国花鲈 *Lateolabrax maculatus* 等鱼类、安氏白虾等虾类和浮游动物;第2类是以SOM为主要碳源贡献的生物,代表种类有鲮鱼 *Mugil cephalus* 等鱼类和日本囊对虾;第3类是以浮游植物、SOM为主,POM为辅的生物种类,典型代表是刀额新对虾 *Metapenaeus ensi*、周氏新对虾 *Metapenaeus joyneri* 等虾类和小黄鱼。

3.4 营养级分析

根据吕泗渔场近岸海域夏季主要生物的营养级构建了两种营养级谱(图4),左边的营养级谱(Trophic Level Spectrum, TLS)是以浮游动物作为基线生物,

营养级范围为2.00~4.18;位于2.50营养级以下的生物种类只有浮游动物;位于2.50~3.00营养级上的生物种类有3种鱼类、4种虾类、日本鳎 *Charybdis japonica* 和毛蚶 *Scapharca subcrenata*;位于3.00~3.50营养级上的生物种类有7种鱼类、5种虾类和三疣梭子蟹;位于3.50~4.00营养级上的生物种类有10种鱼类和火枪乌贼 *Loligo beka*;位于4.00以上营养级的有多鳞鳢、褐菖鲈 *Sebastiscus marmoratus* 和黑鲷 *Acanthopagrus schlegelii*。

右边营养级谱中的基准值由浮游植物、POM、SOM通过 IsoSource 模型权衡叠加而成,营养级范围在1.74~3.92。由于基准值的改变而使主要生物的营养级普遍降低。位于2.50~3.00营养级上的生物种类有5种鱼类、6种虾类和日本鳎;位于3.00~3.50营养级上的生物种类有10种鱼类、3种虾类和三疣梭子蟹;位于3.50~4.00营养级上的有8种鱼类和火枪乌贼,火枪乌贼的营养级几乎不变。

为探究生物个体与营养级的关系,本研究对不同站位捕获的不同体长小黄鱼的营养级进行比较(图5)。可以看出,随着体长的增加,小黄鱼的营养级也逐渐增大,呈现正相关性($R^2=0.4552$, $n=9$)。

4 讨论

4.1 潜在碳源分析

浮游植物、POM、SOM等是驱动食物网物质和能量流转的主要潜在碳源基础^[22-23],尤其在近岸海域^[24]。浮游植物是海洋生产者,是海洋食物网的基础之一,其碳稳定同位素组成主要来自海洋水体中的溶解无机碳^[25],这是确定潜在碳源的重要依据。基于本研究 IsoSource 模型计算结果显示,3种潜在碳源(浮游植物、POM和SOM)对消费者的贡献比例,浮游植物所占比例较高,平均达到58.7%。蔡德陵等^[26]在崂山湾进行水体生物食物网调查时发现,浮游植物碳是其主要来源。在本研究中,大多数消费者以浮游植物作为主要碳源贡献,典型代表为浮游动物(91.3%)以及一些岩礁性鱼类(褐菖鲈(68.2%)、黑鲷(82%)等)和凶猛性鱼类(中国花鲈(84.7%)、银鲈 *Pampus argenteus*(73.2%)等),说明了相对于POM和SOM,该海域的重要碳源为浮游植物。

POM对所有生物的碳源贡献值范围为0~25.2%(均值为12.5%),魏虎进等^[27]在研究象山港海洋牧场食物网结构时发现,相对于浮游植物和SOM,POM的相对贡献率最小。尽管如此,本研究的POM的贡献率相对于其他海域偏高^[27-28],原因是本研究选取站点

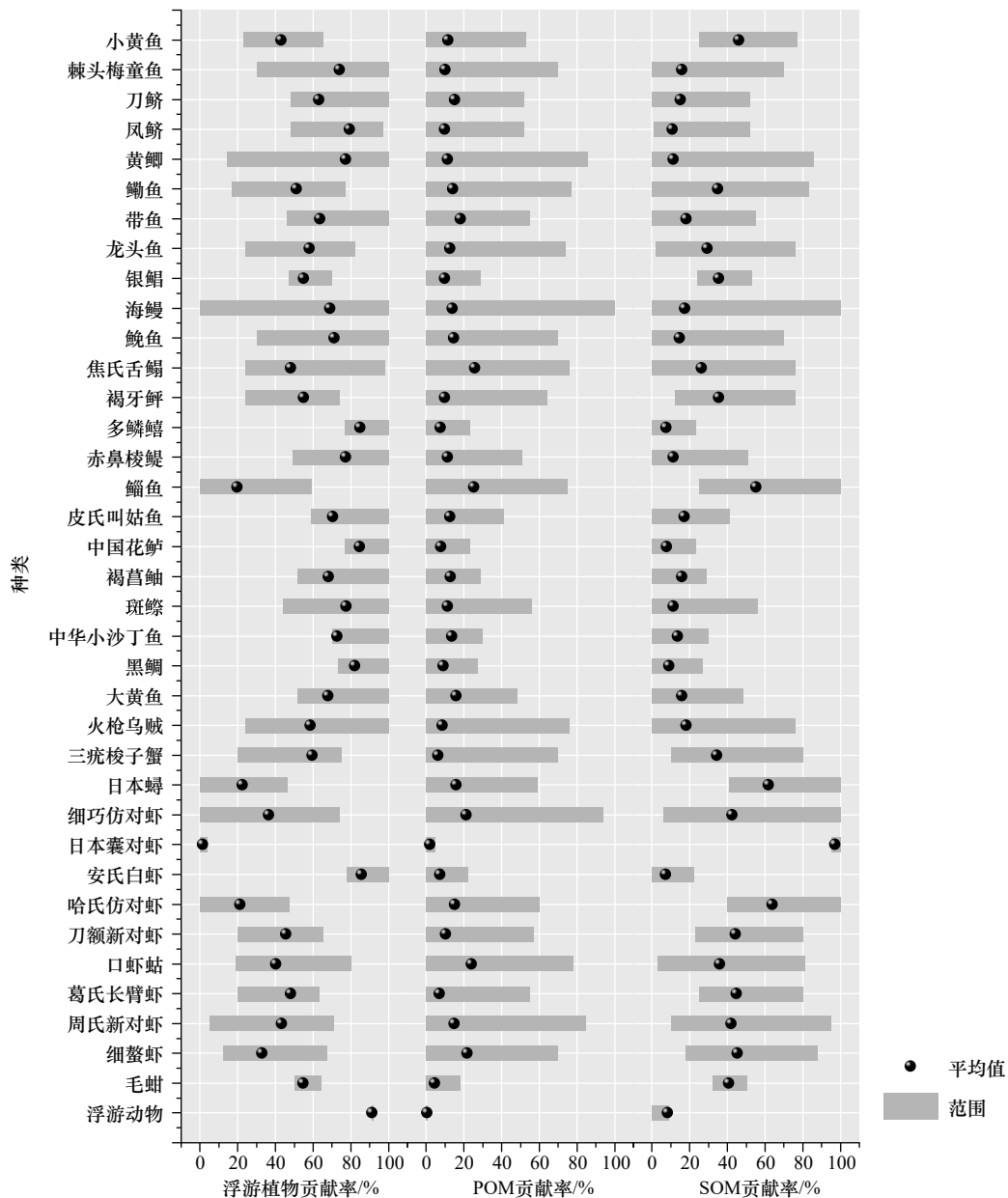


图3 基于 IsoSource 模型计算主要生物体的潜在碳源贡献均值和范围

Fig. 3 The mean and range of contribution of potential carbon sources to the main creatures calculated based on IsoSource model

位于近岸海域, 水体中悬浮颗粒物含量较高。此外, 本研究大多数生物种类的 POM 碳源贡献范围较广, 甚至从 0 到 100%, 存在较大不确定性, 这与海域水环境(温度、盐度等)密切相关^[29]。比如, Xu 等^[30]认为, 随着气候变暖, 藻华现象加剧, 微囊藻毒素的增加进一步改变了藻类源 POM 的比例。SOM 也是驱动食物网物质流转的重要碳源之一, 其组成比较复杂, 如 POM 的自然沉降、藻类死亡后的有机碎屑以及底栖微藻等^[27], 在本研究中, SOM 是底栖虾蟹类的主要碳源贡献, 也是一些底栖食性鱼类的碳源贡献, 如小黄鱼等。

4.2 营养级比较及分析

营养级差异是由多种因素共同导致的, 不仅涵盖

了基线生物和营养级富集度, 还和体长规格密切等相关。Romanuk 等^[31]研究了 57 目 8 361 种鱼类体长规格与营养级之间的关系, 显示所有物种的营养级与最大长度呈正相关。本研究中, 小黄鱼的营养级随体长的增加呈现明显上升趋势(图 5), 这与小黄鱼生活史中发生的食性转变现象有关。研究表明, 小黄鱼幼体时期主要以浮游生物为食, 而成体的食性转变为以小型鱼类、虾类为主^[32]。由于这种栖息环境和食性特征的差异, 会使得体长相差太大的同种生物相差 1 个以上的营养级^[33]。

基线生物的选择至关重要, 对于河口和海湾生态系统, 在选择常年存在且食性相对稳定的初级消费者

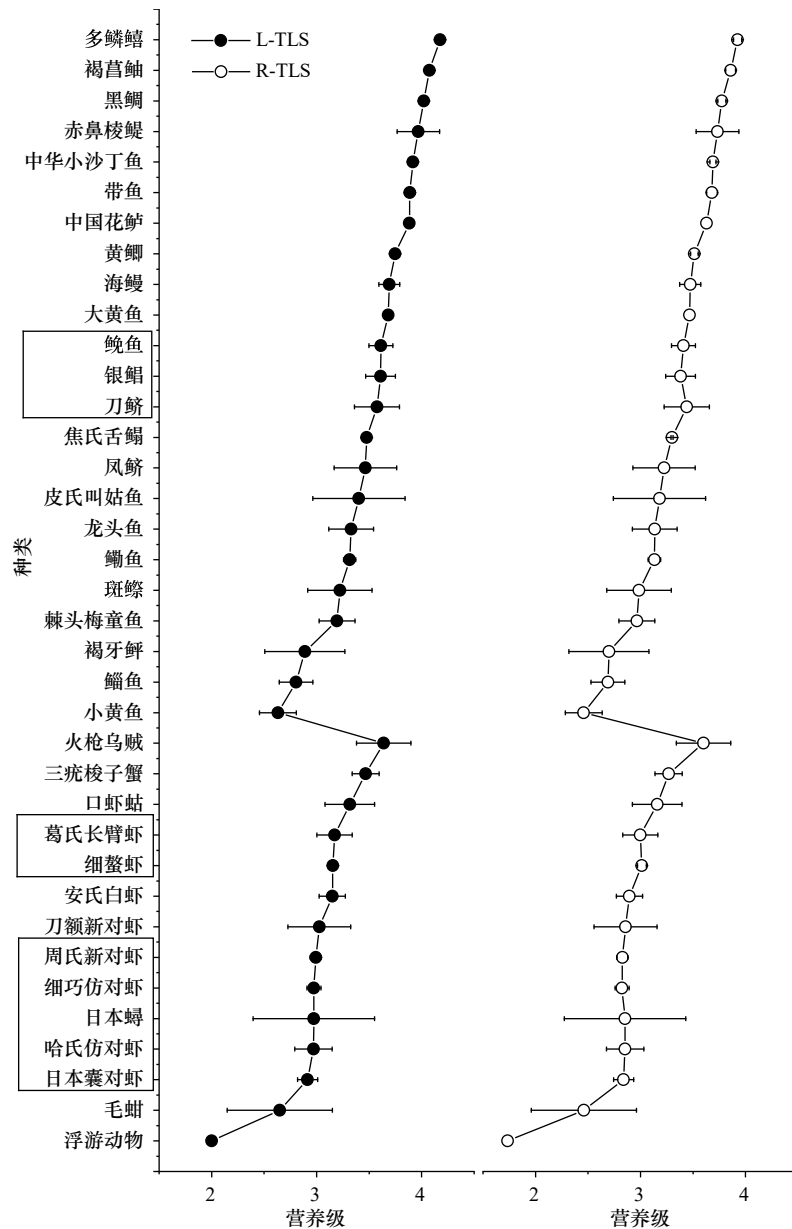


图 4 吕泗渔场近岸海域 L-TLS(左营养级谱)和 R-TLS(右营养级谱)的物种营养级比较

Fig. 4 Comparison of trophic levels of species plotted by L-TLS (left trophic level spectrums) and R-TLS (right trophic level spectrums) in coastal waters of Lüsi fishing ground

被框选物种在两个营养级的营养位置不同

The trophic position of the framed species differed between the two trophic level spectrums

和底栖动物或 POM 等为基线时, 仍需考虑基线的时空异质性, 并且针对结构复杂的生态系统需要确定多个基线以全面表征食物网结构^[34]。如本研究的图 4 所示, 相对于左营养级谱, 尽管右营养级谱中的生物种类平均下降 0.19 个营养级, 但整体趋势是不变的, 除了方框中生物种类的营养位置发生了改变。在左营养级谱中, 银鲳的营养级与鳓鱼 *Müchthys müny* 相同, 刀鲚 *Coilia macrognathos* 最低, 而右营养级谱中, 刀鲚的营养位置要比这两个种类都要高。从其他海

域构建的食物网来看, 刀鲚的营养级低于银鲳和鳓鱼, 且因为刀鲚的浮游动物食性特征, 有可能右营养级谱高估了刀鲚的营养级^[12, 35]。此外, 结合了 3 大潜在碳源作为影响指标, 右营养级谱中的虾类——周氏新对虾 *Metapenaeus joyneri*、细巧仿对虾 *Parapenaeopsis tenella*、哈氏仿对虾 *Parapenaeopsis hardwickii*、日本囊对虾的营养位置更是发生了巨大变化。右营养级谱中, 基准值随着单个物种潜在碳源叠加比例的不同而变化, 但对于处于中高级消费者位置的鱼类来

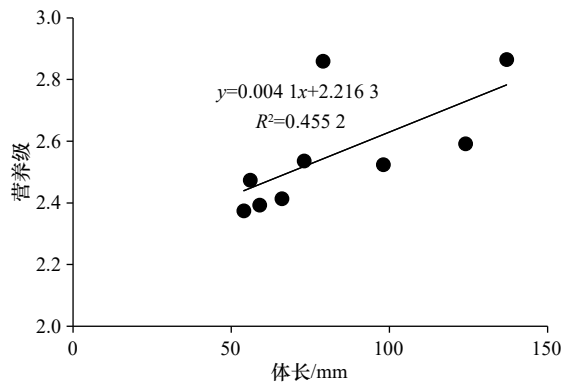


图 5 小黄鱼体长与营养级的关系

Fig. 5 The relationship between body length and trophic level value for *Larimichthys polyactis*

说, 叠加潜在碳源作为基线生物的结果影响不大。以上结果表明, 当存在多种食物来源时, 叠加多种潜在碳源的右营养级谱更适合反映真实的生物营养级, 而具有单一基线的左营养级谱更适合分析单一食物来源的条件或较高营养级的物种^[36-37]。因此, 本研究中鱼类受到潜在碳源的影响较小, 营养位置几乎不发生改变, 而对于直接摄食浮游植物、沉积有机物等食物的虾蟹类来说, 以潜在碳源为基准值的影响对它们营养位置的变动更大一些。

本研究中, 虾蟹类的营养级甚至超过小黄鱼和褐

牙鲆 *Paralichthys olivaceus* 等底栖浮游生物食性的鱼类, Du 等^[38]通过 EvE 模型证明了蝶形目、石首鱼科鱼类与虾类的营养级相近, 与本研究结果一致; 鲻鱼是因为在本研究中的体长规格过小, 导致营养级较低, 但体型相差不大的赤鼻棱鳀 *Thryssa kammalensis* 和黄鲫 *Setipinna taty* 的营养级却高于鲻鱼, 可能与鳀鲱科鱼类摄食底层虾类比例较高有关。在本次调查所采集样品中, 几乎没有发现诸如鲈形目的顶级消费者, 这与近年来江苏近海被污染的水域环境和不断简化的食物网密切相关^[39], 在中国的各大海域也均有报道^[14-15]。类似的情况在长江口海域也有出现^[14, 35]。

5 结论

本研究结果表明, 吕泗渔场近岸海域夏季主要生物的潜在碳源主要是浮游植物和 SOM, 其中浮游植物的贡献率占比最大, 达到 58.7%。POM 的碳源贡献存在较大不确定性, 这与海域 pH、温度、盐度等环境因子密切相关。叠加这 3 种潜在碳源作为基准值计算得到的生物营养级低于传统营养级, 且大多数虾蟹类的营养位置发生了改变, 表明了这种叠加效果的影响可能更适用于低营养级的生物种类, 而以单一物种为基线生物可能更适用于中、高营养级的生物种类。

参考文献:

- [1] Kaehler S, Pakhomov E A, Mcquaid C D. Trophic structure of the marine food web at the Prince Edward Islands (Southern Ocean) determined by $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ analysis[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, 208: 13-20.
- [2] Frederiksen M, Edwards M, Richardson A J, et al. From plankton to top predators: bottom-up control of a marine food web across four trophic levels[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2006, 75(6): 1259-1268.
- [3] Duffy J E, Cardinale B J, France K E, et al. The functional role of biodiversity in ecosystems: incorporating trophic complexity[J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(6): 522-538.
- [4] Cortés E. A critical review of methods of studying fish feeding based on analysis of stomach contents: application to elasmobranch fishes[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1997, 54(3): 726-738.
- [5] Zanden M J V, Rasmussen J B. Primary consumer $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ and the trophic position of aquatic consumers[J]. *Ecology*, 1999, 80(4): 1395-1404.
- [6] Jennings S, Greenstreet S, Hill L, et al. Long-term trends in the trophic structure of the North Sea fish community: evidence from stable-isotope analysis, size-spectra and community metrics[J]. *Marine Biology*, 2002, 141(6): 1085-1097.
- [7] Hadwen W L, Russell G L, Arthington A H. Gut content- and stable isotope-derived diets of four commercially and recreationally important fish species in two intermittently open estuaries[J]. *Marine and Freshwater Research*, 2007, 58(4): 363-375.
- [8] Christianen M J A, Middelburg J J, Holthuijsen S J, et al. Benthic primary producers are key to sustain the Wadden Sea food web: stable carbon isotope analysis at landscape scale[J]. *Ecology*, 2017, 98(6): 1498-1512.
- [9] Peterson B J, Fry B. Stable isotopes in ecosystem studies[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1987, 18: 293-320.
- [10] Raffaelli D. Nutrient enrichment and trophic organisation in an estuarine food web[J]. *Acta Oecologica*, 1999, 20(4): 449-461.
- [11] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: models, methods, and assumptions[J]. *Ecology*, 2002, 83(3): 703-718.
- [12] 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*, 2005, 48(6): 531-539.
- [13] Cai Deling, Li Hongyan, Tang Qisheng, et al. Establishment of trophic continuum in the food web of the Yellow Sea and East China Sea ecosystem: Insight from carbon and nitrogen stable isotopes[J]. *Science in China Series C: Life Sciences*, 2005, 48(6): 531-539.
- [14] Hussey N E, Macneil M A, McMeans B C, et al. Rescaling the trophic structure of marine food webs[J]. *Ecology Letters*, 2014, 17(2):

- 239–250.
- [14] Qu Pei, Wang Qixiang, Pang Min, 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.
- [15] 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.
Ma Qiuyun, Han Dongyan, Liu He, et al. Construction of a continuous trophic spectrum for the food web in Jiaozhou Bay using stable isotope analyses[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(21): 7207–7218.
- [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[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration. GB/T 12763.6—2007, Specifications for oceanographic survey—Part 6: marine biological survey[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.
- [17] Jacob U, Mintenbeck K, Brey T, et al. Stable isotope food web studies: a case for standardized sample treatment[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 287: 251–253.
- [18] Phillips D L, Gregg J W. Source partitioning using stable isotopes: coping with too many sources[J]. *Oecologia*, 2003, 136(2): 261–269.
- [19] Bănară 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): 592–540.
- [20] 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.
- [21] Plass-Johnson J G, McQuaid C D, Hill J M. Stable isotope analysis indicates a lack of inter- and intra-specific dietary redundancy among ecologically important coral reef fishes[J]. *Coral Reefs*, 2013, 32(2): 429–440.
- [22] Weitere M, Scherwass A, Sieben K T, et al. Planktonic food web structure and potential carbon flow in the lower river rhine with a focus on the role of protozoans[J]. *River Research and Applications*, 2005, 21(5): 535–549.
- [23] Heyng A M, Mayr C, Lücke A, et al. Late Holocene hydrologic changes in northern New Zealand inferred from stable isotope values of aquatic cellulose in sediments from Lake Pupuke[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2014, 51(4): 485–497.
- [24] 孙明, 王彬, 李玉龙, 等. 基于碳氮稳定同位素技术研究辽东湾海蜇的食性和营养级[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(4): 1103–1108.
Sun Ming, Wang Bin, Li Yulong, et al. Feeding habitats and trophic levels of *Rhopilema esculentum* Kishinouye in Liaodong Bay based on analyzing carbon and nitrogen stable isotopes[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(4): 1103–1108.
- [25] Gillikin P D, Lorrain A, Bouillon S, et al. Stable carbon isotopic composition of *Mytilus edulis* shells: relation to metabolism, salinity, $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ and phytoplankton[J]. *Organic Geochemistry*, 2006, 37(10): 1371–1382.
- [26] 蔡德陵, 孟凡, 韩贻兵, 等. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值作为海洋生态系统食物网示踪剂的研究——崂山湾水体生物食物网的营养关系[J]. *海洋与湖沼*, 1999, 30(6): 671–678.
Cai Deling, Meng Fan, Han Yibing, et al. Studies on $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios as a tracer for food web in a marine ecosystem—the trophic relations in pelagic food webs in Laoshan Bay[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1999, 30(6): 671–678.
- [27] 魏虎进, 朱小明, 纪雅宁, 等. 基于稳定同位素技术的象山港海洋牧场区食物网基础与营养级的研究[J]. *应用海洋学学报*, 2013, 32(2): 250–257.
Wei Hujin, Zhu Xiaoming, Ji Yaning, et al. Study on the food web structure and their trophic levels of marine ranching area in Xiangshan Harbor[J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2013, 32(2): 250–257.
- [28] 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.
Xie Bin, Li Yunkai, Zhang Hu, et al. Food web foundation and seasonal variation of trophic structure based on the stable isotopic technique in the marine ranching of Haizhou Bay, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(7): 2292–2298.
- [29] Mintenbeck K, Jacob U, Knust R, et al. Depth-dependence in stable isotope ratio $\delta^{15}\text{N}$ of benthic POM consumers: the role of particle dynamics and organism trophic guild[J]. *Deep-Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2007, 54(6): 1015–1023.
- [30] Xu J, Lü H, Xu X, et al. Dual stable isotope tracing the source and composition of POM during algae blooms in a large and shallow eutrophic lake: All contributions from algae?[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 102(7): 599–607.
- [31] Romanuk T N, Hayward A, Hutchings J A. Trophic level scales positively with body size in fishes[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2011, 20(2): 231–240.
- [32] 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.
- [33] Ji Weiwei, Chen Xuezhong, Jiang Yazhou, 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.
- [34] 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.
Gong Yi, Chen Ling, Li Yunkai. Selection of isotopic baselines in marine ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(7): 2399–2404.
- [35] 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.

- Yan Guangsong, Zhang Tao, Zhao Feng, et al. A study on trophic level of the major fishery species from the Yangtze Estuary based on stable isotope technology[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(11): 3131–3136.
- [36] Valls M, Olivar M P, De Puelles M L F, et al. Trophic structure of mesopelagic fishes in the western Mediterranean based on stable isotopes of carbon and nitrogen[J]. *Journal of Marine Systems*, 2014, 138: 160–170.
- [37] Vinagre C, Salgado J P, Mendonça V, et al. Isotopes reveal fluctuation in trophic levels of estuarine organisms, in space and time[J]. *Journal of Sea Research*, 2012, 72: 49–54.
- [38] Du J G, Cheung W W L, Zheng X Q, et al. Comparing trophic structure of a subtropical bay as estimated from mass-balance food web model and stable isotope analysis[J]. *Ecological Modelling*, 2015, 312: 175–181.
- [39] 刘海林, 仲霞铭, 汤建华, 等. 江苏近海鱼类群落组成和多样性的季节变化[J]. *海洋渔业*, 2017, 39(1): 9–20.
- Liu Hailin, Zhong Xiaming, Tang Jianhua, et al. Seasonal changes of fish community composition and diversity in the offshore waters of Jiangsu[J]. *Marine Fisheries*, 2017, 39(1): 9–20.

The potential carbon source and trophic level analysis of main organisms in coastal water of Lüsi fishing ground, based on carbon and nitrogen stable isotope analysis

Gao Shike¹, Sun Wen¹, Zhang Shuo^{1,2}

(1. *College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China*; 2. *Joint Laboratory for Monitoring and Conservation of Aquatic Living Resources in the Yangtze River Estuary, Shanghai 201306, China*)

Abstract: Trophic level among main organisms in coastal water of Lüsi fishing ground in summer, 2018, were analyzed in this study by stable isotope method. Using IsoSource model, we calculated potential carbon source contribution of the phytoplankton, POM and SOM of consumers, and then compared the former and latter TLs variation of main organisms by overlapping potential carbon source influence. Results showed that phytoplankton and SOM were main potential carbon source of main organisms in coastal water of Lüsi fishing ground in summer. Two trophic level spectrums were constructed by overlapping three potential carbon sources and a single species as the baseline organisms, respectively. The trophic level of the right trophic level spectrum ranged from 1.74 to 3.92, which was averagely 0.19 lower than that of the left trophic level spectrum. Although the overall trend was unchanged, the trophic positions of some fish and most shrimps were changed in two spectrums. The baseline organisms in the right trophic level spectrum changed with the different stacking ratio of potential carbon sources, which could reflect the trophic level more effectively and was more suitable for organisms at low trophic levels, such as shrimp and crabs. However, this had little impact on fish in the position of middle and advanced consumers.

Key words: stable isotope; Lüsi fishing ground; main organisms; potential carbon contribution; trophic level analysis