

杨凡, 印瑞, 范江涛, 等. 中街山列岛海域食物网结构初步研究及主要消费者潜在碳源分析[J]. 海洋学报, 2023, 45(1): 25–37, doi:10.12284/hyxb2023056

Yang Fan, Yin Rui, Fan Jiangtao, et al. Preliminary study on the food web and potential carbon sources of main consumers in Zhongjieshan Islands sea area in Zhoushan, Zhejiang[J]. Haiyang Xuebao, 2023, 45(1): 25–37, doi:10.12284/hyxb2023056

中街山列岛海域食物网结构初步研究 及主要消费者潜在碳源分析

杨凡^{1,2}, 印瑞², 范江涛³, 蒋日进^{2*}, 肖祎^{1,2}, 王静^{1,2}, 徐汉祥^{1,2}, 刘明智^{1,2}

(1. 浙江海洋大学 海洋与渔业研究所, 浙江 舟山 316021; 2. 浙江省海洋水产研究所 农业农村部重点渔场渔业资源科学观测实验站 浙江省海洋渔业资源可持续利用技术研究重点实验室, 浙江 舟山 316021; 3. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300)

摘要: 为了解中街山列岛的食物网结构特征, 本研究于 2020 年 7 月在中街山列岛海域采集鱼类、虾蟹类、头足类、贝螺类和浮游动物等消费者样本, 利用碳、氮稳定同位素技术, 分析大型海藻、浮游植物、悬浮颗粒有机物 (POM) 和沉积物有机物 (SOM) 4 种潜在碳源对消费者的贡献率以及中街山列岛海域的食物网结构和营养关系。结果表明: (1) 碳源的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围在 -22.93‰ ~ -9.73‰ 之间, $\delta^{15}\text{N}$ 值范围在 1.72‰ ~ 7.68‰ 之间, 消费者的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围在 -21.95‰ ~ -12.55‰ 之间, $\delta^{15}\text{N}$ 值范围在 4.13‰ ~ 12.92‰ 之间, 不同碳源及不同消费者类群之间的碳、氮稳定同位素均有显著性差异 ($p<0.01$); (2) 应用 SIBER 模型计算中街山列岛海域的营养结构指标, 与其他海域的研究结果对比发现, 该海域生态系统的食源多样性更加丰富, 营养级长度和生态位总空间较高; (3) 应用 SIAR 模型计算碳源贡献率, 结果表明浮游植物和 POM 是该海域的重要碳源, 平均贡献率为 29.63% 和 28.72%; 浮游植物对浮游动物的贡献率最大为 80.58%, POM 对鱼类的贡献率最大为 79.74%; SOM 对虾蟹类的贡献率最大为 49.94%; 大型海藻对消费者的碳源贡献率最低, 平均为 18.37%; (4) 以浮游动物为基线生物计算得知主要消费者的平均营养级在 1.58~3.63 之间, 营养层次为 3 级, 各种类平均营养级由大到小依次为头足类 (3.09)、鱼类 (3.00)、虾蟹类 (2.70)、贝螺类 (1.82), 中街山列岛海域消费者以低、中级肉食性动物为主, 杂食性和高级肉食性动物较少。本研究初步探明了中街山列岛生态系统食物网, 为了解该生态系统营养结构奠定了基础, 也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。

关键词: 中街山列岛; 食物网; 潜在碳源; 营养级

中图分类号: P714⁺.4; P148

文献标志码: A

文章编号: 0253-4193(2023)01-0025-13

1 引言

食物网结构研究是海洋生态学研究的一个重要领域, 海洋生物的营养结构、营养级和食源分析等方面是其重要组成部分^[1-2]。探究海洋生态系统中生物

的食源特征和营养关系, 建立基础食物网结构, 可以更好地了解复杂生态系统中的物质循环和能量流动规律^[3]。在复杂的海洋生态系统中, 悬浮颗粒有机物 (POM)、沉积物有机物 (SOM)、浮游植物、大型海藻、海草和陆源性有机质等是鱼类、大型无脊椎动物

收稿日期: 2022-09-09; 修订日期: 2022-11-03。

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFD0900904, 2019YFD0901204); 中国水产科学研究院南海水产研究所自选课题 (2021HZ064)。

作者简介: 杨凡 (1997—), 女, 山东省济宁市人, 主要研究方向为渔业资源生态学。E-mail: aisuk_yangfan@163.com

* 通信作者: 蒋日进 (1977—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为渔业资源生态学。E-mail: jiangridge@163.com

和浮游动物的重要碳源和能量来源^[4],碳源又是各类生物重要的营养物质^[5],但由于生态系统的复杂性,不同碳源对食物网的贡献程度各不相同且难以确定^[6]。研究食物网能量来源的传统方法是胃含物分析法,由于此方法具有瞬时性,不能代表长时间的摄食情况,因此结果存在一定的误差^[7]。近年来,稳定同位素技术不断发展,碳、氮稳定同位素也在食物网结构研究中得到广泛应用,其中, $\delta^{13}\text{C}$ 与饵料生物相近,可以指示食物来源的信息^[8], $\delta^{15}\text{N}$ 在相邻营养级之间存在3%~4%的富集效应,可用于估算生物体的营养级^[9]。因此,稳定同位素可以确定食物来源及食物贡献,更加准确的表征食源贡献和食物网中不同生物的营养位置^[10]。此外在碳、氮稳定同位素比值基础上发展来的一系列多变量统计指标为比较不同群落的营养生态位宽度、查明营养关系、探明营养结构提供了重要方法^[11-12]。

中街山列岛海域地处舟山群岛的东部,属于浙江北部近岸海域,该海域受众多水流交汇的影响,营养物质大量聚集,饵料生物丰富,成为多种海洋生物生长繁殖的重要栖息场所,历来有“东海鱼仓”之美誉^[13]。由于其具有重要的生态价值,早在2006年就在此设立了国家级海洋特别保护区、国家级海洋牧场示范区^[14]。目前关于该海域的研究主要集中于资源状况、岛礁生境群落结构等方面^[15-17],有关该海域营养结构或食物网结构的系统研究尚未报道,而阐明中街山列岛海域营养结构对海洋牧场的建设至关重要。因此,

本研究基于碳、氮稳定同位素技术初步建立中街山列岛海域食物网,分析主要消费者及潜在碳源的碳、氮稳定同位素特征,揭示不同消费者的潜在碳源,分析营养级层次并探明了食物网的连续营养谱,计算营养结构特征参数,旨在为该生态系统的可持续发展和管理提供科学依据,并了解中街山列岛国家级海洋牧场的食物网提供基础资料。

2 材料与方法

2.1 样品采集与处理

于2020年7月在中街山列岛海域共布设10个站点进行生物样品采集(图1)。鱼类、虾蟹类和贝螺类的采集主要使用三重流刺网和底拖网采集。流刺网网长15 m,内网目直径为26 mm,外网目直径为210 mm,每个调查站位放置两组刺网,放置时间为24 h。底拖网为有翼单囊贴底拖网(网口周长50 m,网身长48 m,网目直径24 mm),拖网时间30 min,拖速3 kn。浮游动物使用浅水2型浮游生物网在表层海水中水平拖曳(拖网时间约10 min)采集;大型海藻主要由阿氏拖网采集,-20℃保存;浮游植物使用标准的小型生物网从水底定点垂直拖网至水面采集;悬浮颗粒有机物使用采水器在距离水面0.5 m处采集15 L海水来获得;使用抓斗式采泥器垂直采集表层沉积物(1~2 cm)样品,于-20℃冷冻保存。所有样品带回实验室作进一步分析。

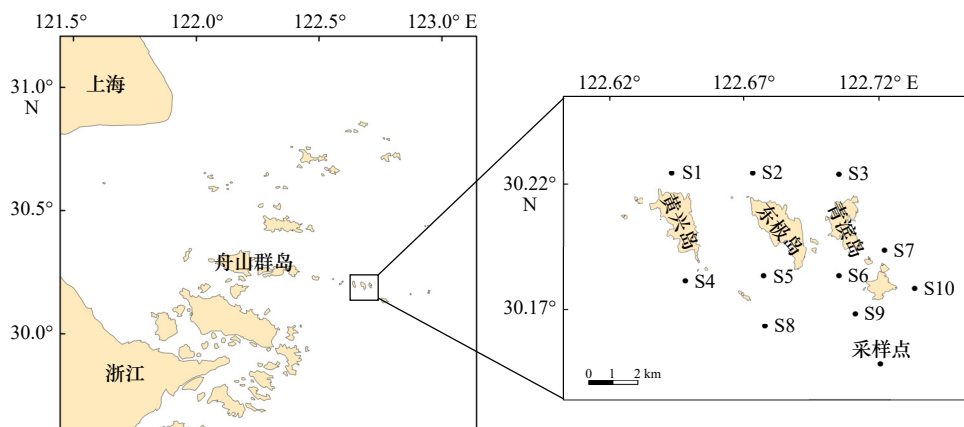


图1 中街山列岛海域采样站位

Fig. 1 Sampling stations in Zhongjieshan Islands sea area

在实验室中,对鱼、虾蟹等消费者进行种类鉴定。鱼类取背部肌肉,虾类取腹部肌肉,蟹类取鳌足部位,头足类取胴体肌肉,贝类取闭壳肌。浮游动物在海水中空腹处理24 h后,经过80目的筛绢过滤,在显微镜下挑出杂质后用10% HCl酸化处理以消除碳酸盐的影响^[18];大型海藻用蒸馏水清洗干净后,将其

置于洗净的干燥器中,用1 mol/L的盐酸蒸汽熏蒸24 h;浮游植物样品的处理首先在显微镜下尽量挑出其中的浮游动物和杂质,用蒸馏水静置,取上清液通过泵系统抽滤至经马弗炉450℃灼烧6 h的玻璃纤维滤膜上(GF/F);POM样品先通过80目筛绢过滤,滤液抽滤至玻璃纤维滤膜上,滤膜样品(浮游植物、

POM)同样采取盐酸熏蒸的方法;先取适量 SOM 样品干燥,磨成粉末,经过孔径为 63 μm 的筛绢分筛,用 1 mol/L 的盐酸酸化,充分反应后用去离子水洗涤^[19]。所有样品在待测前均置于 -20°C 冰箱冷冻保存。

2.2 稳定同位素分析

把上述预处理的样品置于 Alpha 1~2 L Dplus 冷冻干燥机中干燥 24 h,并研磨成粉末状。通过 DELTA V Advantage 同位素质谱仪(Isotope Ratio Mass Spectrometer)测定稳定碳、氮同位素比值。质谱仪检测样品高温燃烧后生成 CO_2 的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比率和 N_2 的 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 比率,并分别与国际标准物箭石和空气中的氮气对比后计算出样品的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 $\delta^{15}\text{N}$ 值。计算方法为

$$\delta X = \left[\left(\frac{R_{\text{sample}}}{R_{\text{standard}}} \right) - 1 \right] \times 1000\text{‰}, \quad (1)$$

式中, δX 为 $\delta^{13}\text{C}$ 值或 $\delta^{15}\text{N}$ 值, $\delta^{13}\text{C}$ 值的测定精度小于 $\pm 0.1\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 值的测定精度小于 $\pm 0.2\text{‰}$; R_{sample} 为所测样品的同位素比值; R_{standard} 为标准物质的同位素比值, $R = ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 或 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ 。

2.3 数据处理

根据生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值计算营养级以体现其在食物链和食物网中的营养位置,其计算公式如下所示^[20]:

$$\text{TL} = \frac{\delta^{15}\text{N} - \delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}}{\text{TEF}} + \text{TL}_{\text{baseline}}, \quad (2)$$

式中, TL 表示营养级; $\delta^{15}\text{N}$ 为生物样品的 $\delta^{15}\text{N}$ 值; $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 为基线生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值,本研究选择浮游动物为基线生物,其 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值为 6.37‰; TEF 为相邻营养级间的营养富集程度,本研究为 3.4‰^[21]; $\text{TL}_{\text{baseline}}$ 为基线生物的营养级,此处为 2。

使用 R 语言(4.0.2)中的“SIBER”模型计算 Layman 等^[11]提出的群落营养结构范围指标,包括以下 6 个参数: $\delta^{13}\text{C}$ 差值(CR, 摄食来源多样性水平)、 $\delta^{15}\text{N}$ 差值(NR, 营养级长度)、同位素坐标点形成的多边形面积(TA, 生物对生态空间的利用情况)、平均离心距离(CD, 群落的营养多样性)、平均最近相邻距离(MNND, 群落的营养相似性)和最近相邻距离的标准差(SDNND, 群落的营养均匀度)。MNND 和 SDNND

可以表示营养结构的冗余程度。R 语言中的“SIAR”模型可以估计多个碳源对不同消费者的贡献率^[22]。利用稳定同位素 ($\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$) 和 siarmcmcdirichletv4 命令估算中街山列岛海域食物网中不同碳源对消费者类群的贡献率,模型中碳、氮稳定同位素营养富集因子(TEF)参考文献[21]中的富集因子, $\delta^{13}\text{C}$ 值、 $\delta^{15}\text{N}$ 值分别为 $(0.4 \pm 1.3)\text{‰}$ 和 $(3.4 \pm 1.0)\text{‰}$ 。

通过 ArcGIS 10.2 软件绘制采样站位图;使用 Excel 2016 软件处理数据及绘制表格;通过 SPSS 24.0 软件进行单因素方差分析;碳源贡献率及连续营养谱的绘制运用 Origin 2022 软件。

3 结果

3.1 碳、氮稳定同位素特征

3.1.1 潜在碳源稳定同位素特征

中街山列岛海域共采集潜在碳源样本 44 个(表 1)。碳源的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围在 $-22.93\text{‰} \sim -9.73\text{‰}$ 之间,分布范围较广,平均值为 $(-17.31 \pm 2.60)\text{‰}$, 从高到低依次为 SOM、大型海藻、POM 和浮游植物; $\delta^{15}\text{N}$ 值范围在 $1.72\text{‰} \sim 7.68\text{‰}$ 之间,平均值为 $(4.86 \pm 1.46)\text{‰}$, 从高到低依次为 POM、SOM、大型海藻和浮游植物。分析结果显示,4 种碳源之间的碳、氮稳定同位素具有显著性差异($p < 0.01$)。

3.1.2 消费者稳定同位素特征

共采集到 49 种消费者,以鱼类和虾蟹类居多,分别为 24 种和 18 种;头足类只有 1 种,为曼氏无针乌贼(*Sepiella maindroni*);贝螺类共有 6 种(表 A1)。把消费者分为鱼类、虾蟹类、头足类、贝螺类和浮游动物,主要消费者类群的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围在 $-21.91\text{‰} \sim -12.55\text{‰}$ 之间,平均值为 $(-16.38 \pm 1.30)\text{‰}$, 从高到低依次为虾蟹类、头足类、鱼类、贝螺类和浮游动物; $\delta^{15}\text{N}$ 值范围在 $4.13\text{‰} \sim 12.92\text{‰}$ 之间,平均值为 $(8.93 \pm 1.71)\text{‰}$, 从高到低依次为头足类、鱼类、虾蟹类、浮游动物和贝螺类(表 2)。不同类群消费者之间的碳、氮稳定同位素均有显著性差异($p < 0.01$)。

表 1 潜在碳源的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值

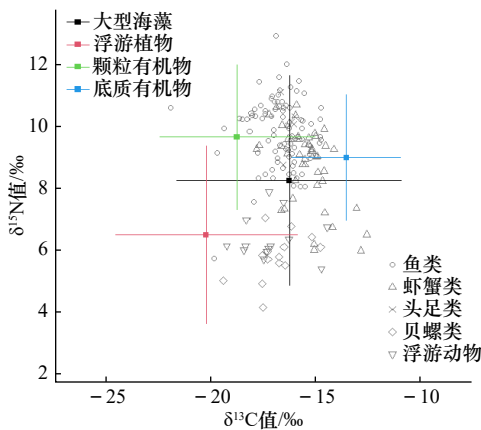
Table 1 Values of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ for the potential carbon sources

分类	数量	($\delta^{13}\text{C}$ 平均值 \pm 标准差)/‰	$\delta^{13}\text{C}$ 范围/‰	($\delta^{15}\text{N}$ 平均值 \pm 标准差)/‰	$\delta^{15}\text{N}$ 范围/‰
大型海藻	30	-16.65 ± 2.33	$-20.00 \sim -9.73$	4.84 ± 1.37	$2.51 \sim 7.68$
浮游植物	5	-20.59 ± 1.72	$-22.93 \sim -18.72$	3.08 ± 1.03	$1.72 \sim 4.35$
颗粒有机物(POM)	6	-19.12 ± 1.13	$-20.89 \sim -17.33$	6.24 ± 0.61	$5.44 \sim 6.90$
底质有机物(SOM)	3	-13.93 ± 0.01	$-13.93 \sim -13.82$	5.58 ± 0.16	$5.47 \sim 5.70$

表 2 主要消费类群的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值Table 2 Values of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ for the major consumer groups

分类	数量	($\delta^{13}\text{C}$ 平均值 \pm 标准差)/‰	$\delta^{13}\text{C}$ 范围/‰	($\delta^{15}\text{N}$ 平均值 \pm 标准差)/‰	$\delta^{15}\text{N}$ 范围/‰
鱼类	93	-16.65 \pm 1.19	-21.91~-14.75	9.79 \pm 1.07	5.71~12.92
虾蟹类	44	-15.42 \pm 1.22	-17.82~-12.55	8.76 \pm 1.24	5.97~10.68
头足类	5	-16.28 \pm 0.31	-16.67~-16.01	10.07 \pm 0.85	8.75~11.10
贝螺类	16	-16.89 \pm 1.12	-19.38~-14.76	5.76 \pm 0.73	4.13~7.03
浮游动物	13	-17.12 \pm 1.38	-19.21~-14.45	6.37 \pm 0.71	5.38~7.37

结合消费者和潜在碳源 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 $\delta^{15}\text{N}$ 值的双位图 (图 2) 来看, 潜在碳源的 $\delta^{13}\text{C}$ 值分布范围较广, 基本涵盖了消费者的 $\delta^{13}\text{C}$ 范围, 而 $\delta^{15}\text{N}$ 值呈现明显阶层分布, 鱼类、虾蟹类和头足类 $\delta^{15}\text{N}$ 值较大, 分布在上层, 而贝螺类和浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值较小, 分布在下层。

图 2 中街山列岛海域主要消费者和潜在碳源的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值双位图Fig. 2 Stable isotope biplots of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of major consumers and the potential carbon sources in Zhongjieshan Islands sea area

3.2 营养结构指标

基于 SIBER 模型计算除浮游动物以外的消费者稳定同位素的营养结构指标^[23], 结果如表 3 所示。中街山列岛海域主要消费者的 $\delta^{13}\text{C}$ 差值 (CR)、 $\delta^{15}\text{N}$ 差

值 (NR)、多边形总面积 (TA) 和平均离心距离 (CD) 均大于其他海域, 表明该海域生物摄食来源广泛, 对空间的利用程度高, 群落的营养多样性也较高。平均最近相邻距离 (MNND) 和最近相邻距离标准差 (SDNND) 较高, 与海州湾的结果较为相似, 表明营养冗余程度较低。

3.3 不同碳源对消费者的贡献

基于 4 种潜在碳源的 SIAR 模型计算结果表明, 大型海藻对所有生物的碳源贡献范围为 0~46.94%, 其中对虾蟹类的贡献最大, 平均值为 26.58%; 浮游植物的贡献范围变化较大, 对所有生物的碳源贡献范围为 0~80.58%, 对浮游动物的贡献最大, 平均值为 65.15%; POM 的贡献范围在 0~79.74% 之间, 其中对鱼类的贡献最大, 平均值为 70.19%; SOM 对所有生物的碳源贡献范围为 0~49.94%, 其中对虾蟹类的贡献最大, 平均值为 35.09% (图 3)。综合来看, 浮游植物和 POM 对中街山列岛海域消费者的碳源贡献最高, 平均值约为 29.63% 和 28.72%; 鱼类和头足类的主要碳源为 POM 和 SOM; 虾蟹类主要碳源为大型海藻、POM 和 SOM; 贝螺类和浮游动物的主要碳源为浮游植物。

3.4 营养级分析

以浮游动物为基线生物, 计算中街山列岛海域主要消费者的营养级并绘制连续营养谱。由图 4 可知, 主要消费者的平均营养级在 1.58~3.63 之间, 均值为

表 3 不同区域主要消费者的营养结构指标

Table 3 Trophic structure indicators of major consumers in different regions

区域	年份	$\delta^{13}\text{C}$ 差值 (CR)	$\delta^{15}\text{N}$ 差值 (NR)	多边形总面积 (TA)	平均离心距离 (CD)	平均最近相邻距离 (MNND)	最近相邻距离标准差 (SDNND)
中街山列岛	2020	9.36	8.79	36.56	1.95	0.60	0.65
海州湾 ^[10]	2014	3.70	6.40	13.00	1.37	0.61	0.64
江苏近海 ^[23]	2017	5.20	8.12	26.95	1.87	0.59	0.45
东海北部 ^[24]	2010	4.83	3.59	12.05	1.51	0.41	0.22
三亚蜈支洲岛 ^[25]	2020	6.36	7.60	29.52	1.92	0.37	0.30

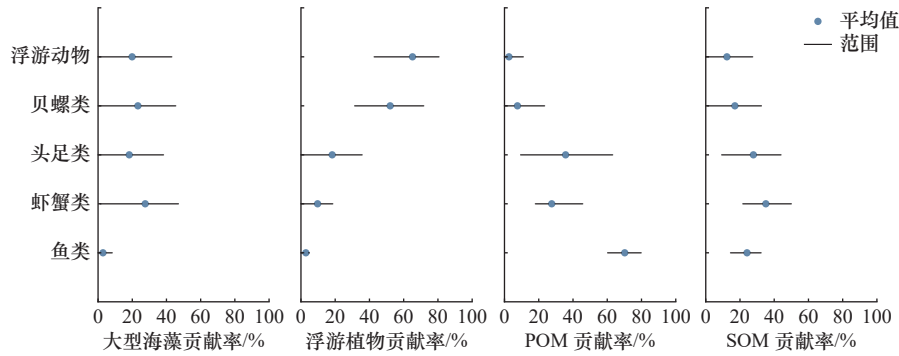


图3 潜在碳源对主要消费类群的贡献率

Fig. 3 Contribution of potential carbon sources to major consumer groups

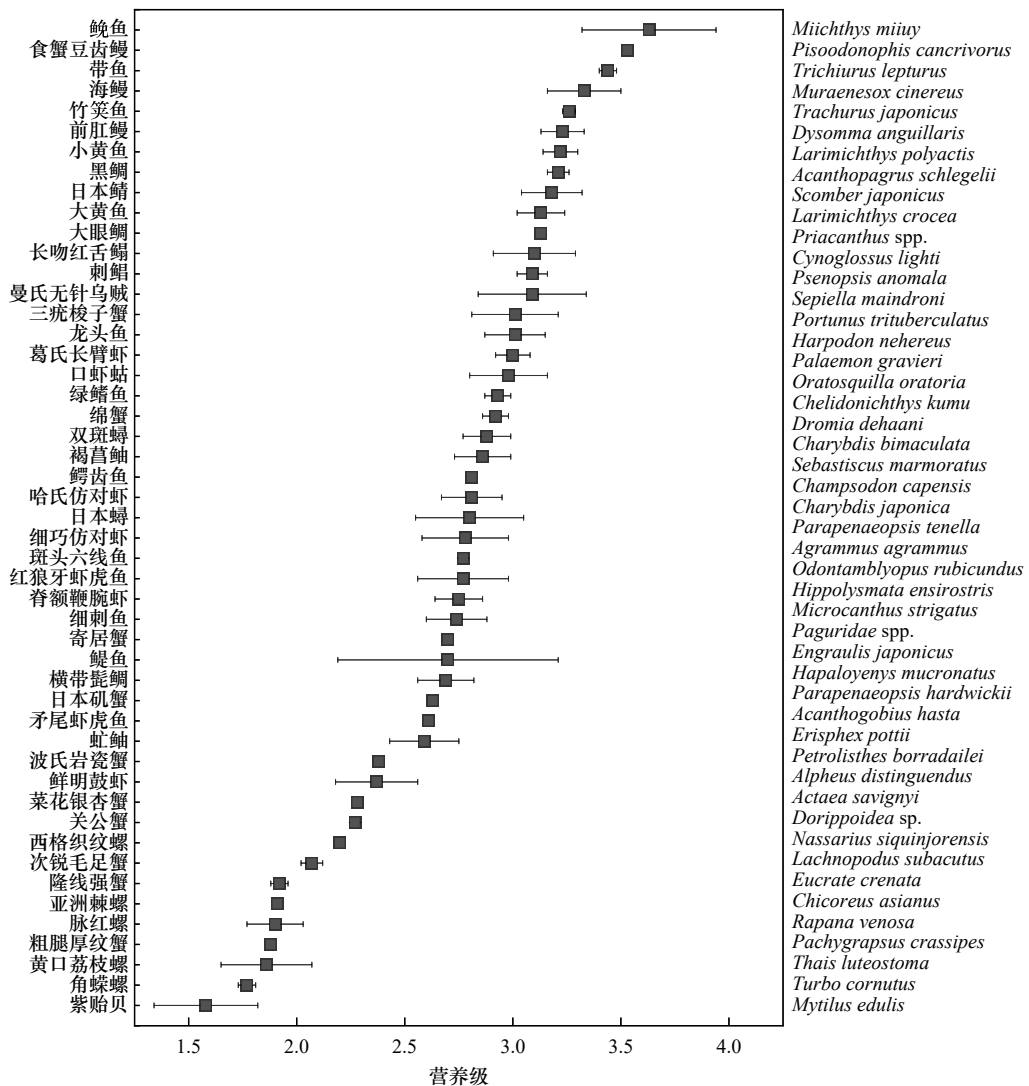


图4 中街山列岛海域主要消费者连续营养谱

Fig. 4 Continuous nutritional profile of major consumers in Zhongjieshan Islands sea area

2.82±0.47, 属于3个营养层次。其中鲩鱼 (*Miichthys miuy*) 的营养级最高, 紫贻贝 (*Mytilus edulis*) 的营养级最低。各类群的营养级差异较大, 鱼类的营养级在 2.59~3.63 之间, 平均值为 3.00±0.32; 虾蟹类营养级在 1.88~3.01 之间, 平均值为 2.70±0.36; 头足类营养

级在 2.69~3.39 之间, 平均值为 3.09±0.25; 贝螺类的营养级在 1.34~2.19 之间, 平均值为 1.82±0.22。

由图4可知鱼类和虾蟹类的营养级跨度较大, 为了更准确地计算潜在碳源对鱼类和虾蟹类的贡献, 根据国内学者对于营养层次的划分标准^[26], 按其营养级

细分为低营养级鱼类(2~2.8)、中营养级鱼类(2.9~3.4)和高营养级鱼类(3.5~4),以及低、中营养级虾蟹类,计算4种潜在碳源对其贡献。由图5可知,大型海藻对不同营养层次的鱼类、虾蟹类的碳源贡献范围为0~48.93%,其中对低营养级鱼类、虾蟹类的贡献较大,平均值分别为26.37%和24.19%;浮游植物对不同营养层次的鱼类、虾蟹类的碳源贡献范围为0~30.77%,对高营养级鱼类的贡献最大,平均值为14.32%;POM对不同营养层次的鱼类、虾蟹类的碳源

贡献范围为0~68.13%,其中对中营养级鱼类的贡献最大,平均值为60.71%;SOM对不同营养层次的鱼类、虾蟹类的碳源贡献范围为0~68.36%,其中对中营养级虾蟹类的贡献最大,平均值为50.29%。综合来看,不同营养层次鱼、虾蟹类主要潜在碳源为POM和SOM,此外大型海藻对低营养级鱼类、虾蟹类贡献也较大,这与图3所示结果较为相符,即鱼类主要碳源为POM和SOM,虾蟹类的主要碳源为大型海藻、POM和SOM。

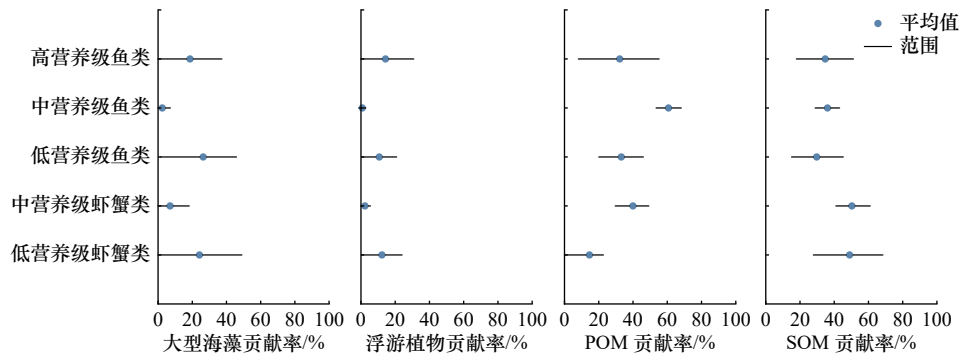


图5 潜在碳源对不同营养级鱼类和虾蟹类的贡献率

Fig. 5 Contribution of potential carbon sources to different trophic levels of fishes and shrimps and crabs

4 讨论

4.1 中街山列岛海域潜在碳源及主要消费者的碳、氮稳定同位素特征

有关近海生态系统食物网的研究表明,浮游植物、大型藻类、POM和SOM是海洋消费者的潜在碳源,也是驱动食物网碳循环的主要动力^[4]。本文结果显示,中街山列岛海域潜在碳源主要由大型海藻、浮游植物、POM和SOM组成,这些碳源的 $\delta^{13}\text{C}$ 值跨度较大(-22.93‰ ~ -9.73‰), $\delta^{15}\text{N}$ 值跨度较小(1.72‰ ~ 7.68‰)。碳源稳定同位素值通常受水域环境、有机质来源等多种因素影响^[22]。大型海藻的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在不同季节存在较大差异,随着气温升高,大型海藻利用 CO_2 的能力下降, $\delta^{13}\text{C}$ 值升高^[27]。本次采样时间在夏季,水体温度较高,因而导致大型海藻的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高;浮游植物作为初级生产者,具有较低的 $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{15}\text{N}$ 值,其中 $\delta^{13}\text{C}$ 组成主要来自海洋水体中的溶解无机碳(DIC),本研究浮游植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围与DIC的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围(-22‰ ~ -18‰)也基本吻合^[28];POM主要包括浮游植物、浮游动物、无机颗粒等^[29],POM的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 $\delta^{15}\text{N}$ 值往往与浮游植物等的 $\delta^{13}\text{C}$ 值、 $\delta^{15}\text{N}$ 值具有相关性^[28];SOM的来源包括藻体凋落物、动物腐尸、粪便、底泥以及来自陆地的POM输入等^[30],有研

究表明,大型海藻处于7月凋亡期时对SOM的贡献最大^[31],而本研究SOM的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与大型海藻的 $\delta^{13}\text{C}$ 值更为接近,这有可能说明大型海藻对SOM有较大贡献。

碳稳定同位素在食物网中富集较低,可用于示踪食物来源^[8]。本研究中不同类群消费者之间的 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在显著性差异($p<0.01$),其中浮游动物和虾蟹类的 $\delta^{13}\text{C}$ 最大差值为 6.66‰ 。研究表明栖息水层影响生物获取不同的能量来源,由此表现出不同的 $\delta^{13}\text{C}$ 值特征,由于底栖生物具有较强的碳同位素富集能力,因此碳同位素比值高的生物与底栖食物网有关,低的与浮游食物网有关^[32],这也说明中街山列岛海域存在底栖食物链与浮游食物链。中街山列岛位于浙江北部,高春霞等^[33]调查过浙江南部近海主要渔业生物的碳、氮稳定同位素比值,其中 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围为 -19.71‰ ~ -14.01‰ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值范围为 7.05‰ ~ 13.69‰ 。本研究与邻近的浙江南部海域结果相近,但生物 $\delta^{13}\text{C}$ 最大值要更大,因为初级生产者的 $\delta^{13}\text{C}$ 值随离岸距离的减小而增大, $\delta^{13}\text{C}$ 值通过食物链传递给消费者,所以生活在近岸的消费者会有较高的 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[34]。中街山列岛整体属于近岸水域,水域范围较小,因此消费者的 $\delta^{13}\text{C}$ 最大值会比浙江南部近海的偏大,并且近岸水域更容易受到人类活动的影响,陆源物质如动植物碎屑

等的输入使得该海域的基础食源更加丰富,进而影响消费者的 $\delta^{13}\text{C}$ 值。较高的日照水平会引起初级生产者的碳富集^[35],随着纬度的升高,水域食物网中最负 $\delta^{13}\text{C}$ 值会出现贫化趋势,因此本研究与浙江南部的最负 $\delta^{13}\text{C}$ 值相比稍贫化。本研究 $\delta^{15}\text{N}$ 值与浙江南部相比较低,这可能与样品差异有关,本研究中鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在5.71‰~12.92‰之间,最大值要小于浙江南部六指马鲛(*Polydactylus sextarius*)、黄鲛鲷(*Lophius litulon*)等高级消费者鱼类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值(最大值约13.5‰);贝螺类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值在4.13‰~7.03‰之间,同样远低于浙江南部双壳类和腹足类的 $\delta^{15}\text{N}$ 值,除采样区域、样品种类和大小规格的差异,沉积物和水体中氮的含量也会影响生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值,如氮含量相对较高,底栖生物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值也会偏大^[36]。

4.2 营养结构指标特征

CR越大代表食物网中初始食源越多^[11]。中街山列岛海域夏季的浮游植物丰度比其他季节要高^[15],而浮游植物作为近海初始食源对消费者的贡献率较大,此外海洋牧场、贻贝筏式养殖区的建立以及部分陆源有机物的输入使得该区域食源更为丰富,因此该海域的CR值高;NR较大表示消费者占有更多的营养层次,食物链更长^[11]。中街山列岛海域夏季鱼卵、仔稚鱼^[13]以及游泳生物^[16]的资源量要高于其他季节,丰富的资源量使得该海域的营养多样性水平较高;由于中街山列岛海域的食源丰富,营养层次多,因此TA值、MNND值和SDNND值同样较高,说明了该海域营养冗余性低的特性。海洋生物群落中饵料生物的变动会引起消费者竞争的变化,进而导致具有相似营养生态位的消费者增多或减少,影响生态系统的冗余程度^[24]。冗余可以提高生态系统的可靠度,维持其结构与功能的正常运行,营养级内的冗余如物种冗余时,某些物种的丧失不会对生态系统的结构和功能产生很大的影响,但由于生态系统不同营养级内物种之间复杂的组合方式,一个物种的丧失可能会引起营养级内或营养级之间的波动^[37]。由于本研究只有不同海域营养结构的对比,因此为了更好地评估海洋牧场建设对中街山列岛海域生态系统稳定性的影响,将来需要从时间尺度上综合阐述该海域的营养结构变化。

4.3 潜在碳源分析

近岸海域由于其特殊的地理位置往往具有十分明显的海陆相互作用^[22]。中街山列岛位于浙江北部近岸水域,沿岸水流和内陆径流的交汇以及岛礁近岸的大型海藻和贻贝筏养殖区为该海域提供了丰富的物质来源^[17]。浮游植物、POM、SOM和大型海藻对中

街山列岛海域主要消费者类群的贡献率平均值依次为29.63%、28.72%、23.28%和18.37%。整体来看,浮游植物和POM是该水域的重要碳源,两者对消费者的贡献范围分别在0~80.58%和0~79.74%之间。浮游植物是海洋重要的初级生产者,是海洋食物网的重要基础,中街山列岛海域浮游植物的碳源比例最大,这与崂山湾^[38]、海州湾^[10]研究结果一致。相较于以往研究,中街山列岛海域浮游植物的碳源贡献略低,这可能是由于温度、海流和营养盐浓度引起的环境变化影响了浮游植物的含量。此外大型藻类会与浮游植物产生资源竞争^[22],而养殖贝类也会影响浮游植物的丰度,从而降低浮游植物的生物量,减少其碳源贡献。POM对中街山列岛海域消费者的贡献率较大,因中街山列岛属于近岸水域,水体中颗粒悬浮物的含量较高,并且大型海藻降解形成的POM和陆源POM会随降雨流入,这也可能增加POM的含量,从而导致其更高的碳源贡献率^[39]。SOM的贡献比例次之,尤其是对于底栖虾蟹类,平均贡献比例为35.09%。这与尹洪洋等^[25]的结论相一致,即SOM对海洋底栖生物的贡献较大。大型海藻在近岸海域食物网中同样占有重要的地位,它不仅通过光合作用为食物网提供了大量的初级生产力,也因其适口性和高营养价值,为小型无脊椎动物等提供了饵料来源^[35]。头足类、虾蟹类等无脊椎动物的直接或间接啃食作用可获得能量并向上传递初级生产力,因此,大型海藻对虾蟹类、头足类、贝螺类和浮游动物的贡献比例要明显大于鱼类。

4.4 营养级分析

基线生物的选取对定量研究生物体的营养位置至关重要,由于基线反映的是最初物质来源的同位素特征,因此一般选择初级生产者或初级消费者作为基线生物^[40]。本研究选择浮游动物作为基线生物,以其氮稳定同位素比值的平均值(6.37‰)作为基准值计算中街山列岛海域主要消费者的营养级,结果显示,主要消费者的平均营养级范围为1.58~3.63,营养层次为3级,其中头足类的平均营养级最高(3.09),其次是鱼类(3.00)、虾蟹类(2.70)和贝螺类(1.82)。营养级的高低与消费者的食性有关,头足类会摄食鱼类,如曼氏无针乌贼具有强大的摄食器官,发达的角质颚和齿舌既能破坏鱼类的头骨,也能冲破甲壳类的外壳,因此食物来源广泛,主食龙头鱼(*Harpodon nehereus*)、带鱼(*Trichiurus lepturus*)、中华管鞭虾(*Solenocera sinensis*)、口虾蛄(*Oratosquilla oratoria*)等游泳生物,故营养级较高^[41]。鱼类营养级在2.59~3.63之间,营养级最低的为虹鲃(*Erisphex pottii*, 2.59),其

次为矛尾虾虎鱼(*Acanthogobius hasta*, 2.61)。中街山列岛海域矛尾虾虎鱼的营养级远低于东海矛尾虾虎鱼的营养级(3.24)^[42],原因是本次调查采集到的矛尾虾虎鱼体长偏小,饵料也以钩虾、糠虾等小型低营养级的生物为主^[43];营养级最高的为鳎鱼(3.63),由于本研究与吕泗渔场鳎鱼的样本规格较为一致,因此营养级结果也相似(吕泗渔场的为3.61)^[44]。有些虾蟹类如口虾蛄、三疣梭子蟹(*Portunus trituberculatus*)、葛氏长臂虾(*Palaemon gravieri*)等营养级较高,甚至超过部分鱼类,一方面是因为 SOM 对底栖虾蟹类的贡献最大, SOM 较高的 $\delta^{15}\text{N}$ 值可以通过食物链富集在虾蟹类体内;另一方面虾蟹类的摄食类型也会随着生长发育而转变,由幼时的滤食性转变为以小型鱼类、海洋无脊椎动物为食的肉食性^[3],本研究中口虾蛄等个体规格较大,因此营养级较高。贝螺类一般以海藻或碎屑为食,故营养级最小^[45]。

根据国内学者对于营养层次的划分标准^[26],中街山列岛海域主要消费者基本处于第二至第四营养级。其中高级肉食性动物有带鱼、食蟹豆齿鳗(*Pisodonophis cancrivorus*)和鳎鱼,即营养级位于3.5~4之间,占总数的6.12%;由龙头鱼、长吻红舌鲷(*Cynoglossus lighti*)、曼氏无针乌贼等为代表的中级肉食性动物(2.9~3.4),和以鳀鱼(*Engraulis japonicus*)、虹鲷、鲜明鼓虾(*Alpheus distinguendus*)为代表的低级肉食性动物分别占总数的42.85%和36.73%;而亚洲棘螺(*Chicoreus asianus*)等草食或杂食性动物占14.28%。由此可见,该海域食物网的主要消费者为低、中级肉食性动物,在两端(杂食性和高级肉食性动物)的较少。与邻近海域相比,中街山列岛海域食物网的营养层次范围接近于黄、东海(1.43~3.62)^[42],小于浙江南部近海(2.66~4.21)^[33]。一方面,本研究中低营养级的贝螺类较多,鱼类也以中小型鱼类为主,鲨鱼、鳐类和鲛鳐等大型肉食性鱼类并没有采集到,这会导致营养级偏低;另一方面生

物体长会影响营养级,有些鱼类如带鱼、小黄鱼(*Larimichthys polyactis*)等体长往往与 $\delta^{15}\text{N}$ 呈正相关趋势^[42],不同研究区域,体长有差异的同一种生物营养级也会不同,中街山列岛海域的绿鳍鱼(*Chelidonichthys kumu*)、前肛鳗(*Dysomma anguillaris*)等的营养级远低于浙江南部,原因是本研究的体长规格较小。此外,基线生物的选择以及营养富集因子也会影响营养级结果。高春霞等^[33]选择双壳类(5.34%)作基线生物,而本研究选取的浮游动物(6.37%),但浮游动物不同大小、不同种类以及季节性变化等都会对营养级估算产生影响,有一定的局限性^[25]。营养富集因子本研究选择国际通用的3.4‰,而蔡德陵等^[42]通过室内饲养鳀获得氮富集因子为2.5‰,高世科等^[44]发现叠加潜在碳源作为基准值计算生物营养级更适用于低营养级的生物种类。因此选择合适的基准生物和富集因子更有利于评价生态系统营养结构。

5 结论

本研究表明,中街山列岛海域食物来源丰富、营养多样性水平高,营养冗余性与其他海域对比相对较低,说明该海域饵料生物较多,消费者食源竞争小,处于相似营养生态位的物种少;浮游植物和 POM 是中街山列岛海域的主要碳源,贡献比例平均值分别为29.63%、28.72%;主要消费者的平均营养级范围为1.58~3.63,营养层次为3级,以低、中级肉食性动物为主,杂食性和高级肉食性动物较少。海洋牧场的建设为物种的生存提供了更为有利的生境条件,是中街山列岛海域开展渔业资源养护与修复的有效手段。本研究初步探索了中街山列岛海域的食物网结构,但海洋牧场建设对食物网结构的影响是多方面、长期性的,在将来的研究中,需要结合环境因素(温度、光照、盐度等),从不同时空尺度上综合评估海洋牧场建设对该海域食物网结构以及整个生态系统的影响,也能为近海渔业资源修复等问题提供一定的理论参考。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 刘晓收, 倪大朋, 钟鑫, 等. 黄海大型底栖动物食物网结构和营养关系研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(9): 20-33. Liu Xiaoshou, Ni Dapeng, Zhong Xin, et al. Structure of Benthic food web and trophic relationship of Macrofauna in the Yellow Sea[J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2020, 50(9): 20-33.
- [4] 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.
- [5] 李斌, 徐丹丹, 吴迪, 等. 基于C、N同位素技术的河流食物网基础碳源研究进展[J]. *核农学报*, 2017, 31(5): 1029-1035.

- Li Bin, Xu Dandan, Wu Di, et al. Research on carbon sources of river food webs based on the carbon and nitrogen stable isotopic technique[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(5): 1029–1035.
- [6] Zieman J C, Macko S A, Mills A L. Role of seagrasses and mangroves in estuarine food webs: Temporal and spatial changes in stable isotope composition and amino acid content during decomposition[J]. *Bulletin of Marine Science*, 1984, 35(3): 380–392.
- [7] 王凯, 章守宇, 汪振华, 等. 枸杞岛海藻场褐菖鲉的摄食习性[J]. *水产学报*, 2010, 34(2): 227–235.
Wang Kai, Zhang Shouyu, Wang Zhenhua, et al. Feeding habit of *Sebastes marmoratus* in seaweed bed around Gouqi Island[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2010, 34(2): 227–235.
- [8] Peterson B J, Fry B. Stable isotopes in ecosystem studies[J]. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1987, 18: 293–320.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] Layman C A, Arrington D A, Montaña C G, et al. Can stable isotope ratios provide for community-wide measures of trophic structure?[J]. *Ecology*, 2007, 88(1): 42–48.
- [12] Jackson A L, Inger R, Parnell A C, et al. Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER-Stable Isotope Bayesian Ellipses in R[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2011, 80(3): 595–602.
- [13] 樊紫薇, 蒋日进, 李哲, 等. 中街山列岛海域鱼卵、仔稚鱼群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 2020, 40(13): 4392–4403.
Fan Ziwei, Jiang Rijin, Li Zhe, et al. Community structure of ichthyoplankton and its relationship with environmental factors in Zhongjieshan Islands, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(13): 4392–4403.
- [14] 刘明华, 梁君, 徐汉祥. 中街山列岛海洋保护区虾类优势种时空生态位[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(5): 1746–1752.
Liu Minghua, Liang Jun, Xu Hanxiang. Spatio-temporal niche of dominant shrimp species in the Zhongjieshan Islands Marine Protected Area, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(5): 1746–1752.
- [15] 李振华, 蒋日进, 陈峰, 等. 中街山列岛海域浮游植物群落结构的周年变化特征[J]. *浙江海洋学院学报(自然科学版)*, 2016, 35(4): 299–309.
Li Zhenhua, Jiang Rijin, Chen Feng, et al. The annual characteristics of Phytoplankton communities in Zhongjieshan Islands sea area[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2016, 35(4): 299–309.
- [16] 刘小雄, 王伟定, 梁君, 等. 中街山列岛岛礁生境游泳动物群落多样性及稳定性分析[J]. *浙江海洋学院学报(自然科学版)*, 2014, 33(1): 14–18, 30.
Liu Xiaoxiong, Wang Weiding, Liang Jun, et al. Nekton community diversity and stability in Zhongjieshan Islands reef Island area[J]. *Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science)*, 2014, 33(1): 14–18, 30.
- [17] 梁君, 王伟定, 虞宝存, 等. 中街山列岛海洋保护区岛礁生境鱼类资源及群落多样性季节变化[J]. *海洋与湖沼*, 2014, 45(5): 979–989.
Liang Jun, Wang Weiding, Yu Baocun, et al. Seasonal variations of fish resources and community diversity of reef habitat in marine protected area of Zhongjieshan Islands[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2014, 45(5): 979–989.
- [18] 徐军, 王玉玉, 王康, 等. 水域生态学中生物稳定同位素样品采集、处理与保存[J]. *水生生物学报*, 2020, 44(5): 989–997.
Xu Jun, Wang Yuyu, Wang Kang, et al. Protocols for sample collection, pretreatment and preservation of aquatic organisms in stable isotope ecology[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2020, 44(5): 989–997.
- [19] 朱文涛, 秦传新, 马鸿梅, 等. 大亚湾珊瑚礁生态系统简化食物网的稳定同位素[J]. *水产学报*, 2020, 44(7): 1112–1123.
Zhu Wentao, Qin Chuanxin, Ma Hongmei, et al. Stable isotope analysis of simple food web in coral reef ecosystem of Daya Bay[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2020, 44(7): 1112–1123.
- [20] Zanden M J V, Fetzer W W. Global patterns of aquatic food chain length[J]. *Oikos*, 2007, 116(8): 1378–1388.
- [21] Post D M. Using stable isotopes to estimate trophic position: Models, methods, and assumptions[J]. *Ecology*, 2002, 83(3): 703–718.
- [22] 赵永松, 单秀娟, 杨涛, 等. 庙岛群岛毗邻海域秋冬季底栖食物网潜在碳来源贡献及对碳汇渔业的思考[J]. *渔业科学进展*, 2022, 43(5): 132–141.
Zhao Yongsong, Shan Xiujian, Yang Tao, et al. Contributions of carbon sources to food webs adjacent to the Miaodao archipelago and their implications for carbon sink fisheries[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2022, 43(5): 132–141.
- [23] 陆亚楠, 张瑞, 张虎, 等. 应用稳定同位素技术研究江苏近海食物网营养结构的季节性变化[J]. *海洋学报*, 2022, 44(2): 1–10.
Lu Ya'nan, Zhang Rui, Zhang Hu, et al. Seasonal variation in the trophic structure of food webs in coastal waters of Jiangsu Province based on stable isotope techniques[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(2): 1–10.
- [24] 纪炜炜, 李圣法, 陈雪忠, 等. 基于稳定同位素方法的东海北部及其邻近水域主要游泳动物营养结构变化[J]. *海洋渔业*, 2015, 37(6): 494–500.
Ji Weiwei, Li Shengfa, Chen Xuezhong, et al. Variation in trophic structure of nekton organisms from the northern East China Sea and adjacent waters based on stable isotope values[J]. *Marine Fisheries*, 2015, 37(6): 494–500.
- [25] 尹洪洋, 朱文涛, 马文刚, 等. 三亚蜈支洲岛海洋牧场区域夏季食物网研究[J]. *生态学报*, 2022, 42(8): 3241–3253.

- Yin Hongyang, Zhu Wentao, Ma Wengang, et al. The summer food web in the marine ranch area of Wuzhizhou Island in Sanya, Hainan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(8): 3241–3253.
- [26] 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 Sheng, Jiang Weimin. Study on food web of fishes in the Yellow Sea[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1992, 23(2): 182–192.
- [27] 张靖凡, 蔡恒江, 赵玥茹, 等. 獐子岛岩相潮间带大型海藻有机碳含量及 $\delta^{13}\text{C}$ 值的季节变化特征[J]. *海洋科学*, 2020, 44(2): 56–65.
Zhang Jingfan, Cai Hengjiang, Zhao Yueru, et al. Seasonal variation in the total organic carbon contents and the $\delta^{13}\text{C}$ values of macroalgae in the rocky intertidal zone of the Zhangzi Island[J]. *Marine Sciences*, 2020, 44(2): 56–65.
- [28] 吴莹, 张经, 张再峰, 等. 长江悬浮颗粒物中稳定碳、氮同位素的季节分布[J]. *海洋与湖沼*, 2002, 33(5): 546–552.
Wu Ying, Zhang Jing, Zhang Zaifeng, et al. Seasonal variability of stable carbon and nitrogen isotope of suspended particulate matter in the Changjiang River[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2002, 33(5): 546–552.
- [29] 李敏, 张继红, 吴文广, 等. 獐子岛邻近海域悬浮颗粒物的时空分布特性[J]. *渔业科学进展*, 2018, 39(1): 54–63.
Li Min, Zhang Jihong, Wu Wenguang, et al. The spatial-temporal distribution of the suspended particulate matter in the water adjacent to the Zhangzidao Island[J]. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(1): 54–63.
- [30] Miyatake T, Moerdijk-Poortvliet T C W, Stal L J, et al. Tracing carbon flow from microphytobenthos to major bacterial groups in an intertidal marine sediment by using an *in situ* ^{13}C pulse-chase method[J]. *Limnology and Oceanography*, 2014, 59(4): 1275–1287.
- [31] 吴程宏, 章守宇, 周曦杰, 等. 岛礁海藻场沉积有机物来源辨析[J]. *水产学报*, 2017, 41(8): 1246–1255.
Wu Chenghong, Zhang Shouyu, Zhou Xijie, et al. Identifying sources of sedimentary organic matter in the rocky reef seaweed bed[J]. *Journal of Fisheries of China*, 2017, 41(8): 1246–1255.
- [32] 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.
- [33] 高春霞, 戴小杰, 田思泉, 等. 基于稳定同位素技术的浙江南部近海主要渔业生物营养级[J]. *中国水产科学*, 2020, 27(4): 438–453.
Gao Chunxia, Dai Xiaojie, Tian Siqun, et al. Trophic structure of major fishery organisms in the offshore waters of southern Zhejiang: insights from stable isotope analysis[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, 27(4): 438–453.
- [34] Hobson K A, Piatt J F, Pitocchelli J. Using stable isotopes to determine seabird trophic relationships[J]. *Journal of Animal Ecology*, 1994, 63(4): 786–798.
- [35] 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.
- [36] 张传鑫, 陈静, 纪莹璐, 等. 基于碳氮稳定同位素技术的小清河口邻近海域底栖食物网结构研究[J]. *海洋学报*, 2022, 44(1): 89–100.
Zhang Chuanxin, Chen Jing, Ji Yinglu, et al. Benthic food web structure of Xiaoqing river estuary adjacent sea area revealed by carbon and nitrogen stable isotope analysis[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(1): 89–100.
- [37] 党承林, 黄瑞复. 生态系统的冗余与营养结构模型[J]. *生态学杂志*, 1997, 16(4): 39–46.
Dang Chenglin, Huang Ruifu. Redundancy in ecosystems and the model for trophic structure[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1997, 16(4): 39–46.
- [38] 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 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.
- [39] 莫宝霖, 秦传新, 陈丕茂, 等. 基于碳、氮稳定同位素技术的大亚湾紫海胆食性分析[J]. *中国水产科学*, 2017, 24(3): 566–575.
Mo Baolin, Qin Chuanxin, Chen Pimao, et al. Feeding habits of the purple sea urchin *Heliocidaris crassisipina* based on stable carbon and nitrogen isotope analysis[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2017, 24(3): 566–575.
- [40] 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 ecosystems[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(7): 2399–2404.
- [41] 郭新, 范广钻, 郑国生. 浙江近海曼氏无针乌贼食性的初步研究[J]. *浙江水产学院学报*, 1986, 5(2): 171–175.
Guo Xin, Fan Guangzuan, Jia Guosheng. A preliminary study of the feeding habit of *Sepiella maindroni de rochebrune*[J]. *Journal of Zhejiang College of Fisheries*, 1986, 5(2): 171–175.
- [42] 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, 48(6): 531–539.
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.
- [43] 张家旭, 张云雷, 刘淑德, 等. 山东近海矛尾虾虎鱼生物学特征及其季节变化[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2021, 51(7): 122–130.
Zhang Jiayu, Zhang Yunlei, Liu Shude, et al. The biological characteristics and seasonal variations of *Chaeturichthys stigmatias* inhabit-

- ing the coastal waters of Shandong Province[J]. Periodical of Ocean University of China, 2021, 51(7): 122–130.
- [44] 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.
Gao Shike, Sun Wen, Zhang Shuo. The potential carbon source and trophic level analysis of main organisms in coastal water of Lusi fishing ground, based on carbon and nitrogen stable isotope analysis[J]. Haiyang Xuebao, 2021, 43(6): 71–80.
- [45] 陈玲, 王凯, 周曦杰, 等. 岛礁水域海藻场食物网基准生物的选择[J]. 海洋渔业, 2016, 38(4): 364–373.
Chen Ling, Wang Kai, Zhou Xijie, et al. Investigation on food web's isotopic baseline in typical reef ecosystem-seaweed bed[J]. Marine Fisheries, 2016, 38(4): 364–373.

附录

表 A1 中街山列岛海域主要消费者的体长信息和 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值

Table A1 The body length and $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ values of major consumers in Zhongjieshan Islands sea area

分类	种类	体长范围/mm	数量	($\delta^{13}\text{C}$ 平均值±标准差)/‰	($\delta^{15}\text{N}$ 平均值±标准差)/‰
鱼类	小黄鱼 <i>Larimichthys polyactis</i>	139~166	5	-17.36±0.46	10.53±0.27
	带鱼 <i>Trichiurus lepturus</i>	124~155	4	-16.64±0.79	11.25±0.14
	龙头鱼 <i>Harpodon nehereus</i>	192~235	5	-16.62±0.61	9.78±0.26
	竹筴鱼 <i>Trachurus japonicus</i>	127~138	4	-16.79±0.20	10.64±0.10
	海鳗 <i>Muraenesox cinereus</i>	194~229	3	-16.94±1.05	10.90±0.56
	日本鲭 <i>Scomber japonicus</i>	146~189	4	-15.86±0.48	10.37±0.49
	大黄鱼 <i>Larimichthys crocea</i>	107~179	3	-16.78±0.74	10.22±0.38
	鳀鱼 <i>Engraulis japonicus</i>	56~121	5	-18.46±1.89	8.74±2.40
	褐菖鲉 <i>Sebastes marmoratus</i>	82~180	12	-15.84±0.52	9.30±0.44
	斑头六线鱼 <i>Agrammus agrammus</i>	78~175	10	-16.78±0.73	8.97±0.70
	前肛鳗 <i>Dysomma anguillaris</i>	143~222	5	-17.19±0.76	10.56±0.32
	黑鲷 <i>Acanthopagrus schlegelii</i>	132~191	6	-18.22±1.99	10.47±0.16
	食蟹豆齿鳗 <i>Pisodonophis cancrivorus</i>	127	1	-16.74±0	11.58±0
	鲩鱼 <i>Miichthys miiuy</i>	200~404	3	-16.63±0.24	11.91±1.06
	红狼牙虾虎鱼 <i>Odontamblyopus rubicundus</i>	90~101	2	-15.13±0.19	9.00±0.07
	矛尾虾虎鱼 <i>Acanthogobius hasta</i>	40~52	6	-15.61±0.44	8.39±0.54
	长吻红舌鲷 <i>Cymoglossus lighti</i>	107~198	2	-14.77±0.03	10.12±0.65
	绿鳍鱼 <i>Chelidonichthys kumu</i>	104~108	2	-15.69±0.63	9.52±0.22
	鳄齿鱼 <i>Champsodon capensis</i>	78	1	-17.77±0	9.13±0
	大眼鲷 <i>Priacanthus</i> spp.	131	1	-14.79±0	10.21±0
虹鲷 <i>Erisphex pottii</i>	61	1	-17.41±0	8.45±0	
刺鲷 <i>Psenopsis anomala</i>	147~156	2	-17.44±1.65	10.09±0.23	
细刺鱼 <i>Microcanthus strigatus</i>	94~124	3	-16.71±0.88	8.89±0.49	
横带髯鲷 <i>Haploxyenys mucronatus</i>	113~122	3	-16.25±0.18	8.73±0.45	
虾蟹类	哈氏仿对虾 <i>Parapenaeopsis hardwickii</i>	76~97	3	-15.65±0.17	9.11±0.49
	葛氏长臂虾 <i>Palaemon gravieri</i>	71~82	4	-15.75±1.12	9.98±1.02
	脊额鞭腕虾 <i>Hippolytina ensirostris</i>	72~79	3	-14.91±0.29	8.93±0.36
	细巧仿对虾 <i>Parapenaeopsis tenella</i>	52~66	3	-15.60±0.33	9.02±0.67
	鲜明鼓虾 <i>Alpheus distinguendus</i>	38~51	2	-14.75±0.25	7.64±0.64

续表 A1

分类	种类	体长范围/mm	数量	($\delta^{13}\text{C}$ 平均值 \pm 标准差)/‰	($\delta^{15}\text{N}$ 平均值 \pm 标准差)/‰
	日本矶蟹 <i>Parapenaeopsis hardwickii</i>	48	1	-14.88 \pm 0	8.50 \pm 0
	菜花银杏蟹 <i>Actaea savignyi</i>	55	1	-13.04 \pm 0	7.35 \pm 0
	次锐毛足蟹 <i>Lachnopus subacutus</i>	56~58	2	-13.36 \pm 1.16	6.60 \pm 0.16
	波氏岩瓷蟹 <i>Petrolisthes borrailei</i>	41	1	-16.09 \pm 0	7.65 \pm 0
	隆线强蟹 <i>Eucrate crenata</i>	35~40	2	-15.07 \pm 0.01	6.09 \pm 0.13
	粗腿厚纹蟹 <i>Pachygrapsus crassipes</i>	32	1	-12.83 \pm 0	5.97 \pm 0
	双斑螞 <i>Charybdis bimaculata</i>	71~83	4	-15.47 \pm 0.60	9.35 \pm 0.37
	关公蟹 <i>Dorippoidea</i> sp.	29~34	2	-16.56 \pm 0.10	7.30 \pm 0.03
	日本螞 <i>Charybdis japonica</i>	44~83	3	-14.81 \pm 0.32	9.10 \pm 0.84
	绵蟹 <i>Dromia dehaani</i>	55~57	2	-14.76 \pm 0.32	9.51 \pm 0.22
	寄居蟹 <i>Paguridae</i> spp.	33	1	-15.49 \pm 0	8.75 \pm 0
	三疣梭子蟹 <i>Portunus trituberculatus</i>	73~110	5	-16.38 \pm 0.57	9.82 \pm 0.67
	口虾蛄 <i>Oratosquilla oratoria</i>	55~123	4	-16.92 \pm 1.15	9.71 \pm 0.61
头足类	曼氏无针乌贼 <i>Sepiella maindroni</i>	78~123	5	-16.28 \pm 0.31	10.07 \pm 0.85
贝螺类	黄口荔枝螺 <i>Thais luteostoma</i>	21~40	5	-17.60 \pm 1.33	5.88 \pm 0.72
	角蝶螺 <i>Turbo cornutus</i>	58~60	2	-16.88 \pm 0.57	5.60 \pm 0.14
	亚洲棘螺 <i>Chicoreus asianus</i>	62	1	-14.76 \pm 0	6.08 \pm 0
	西格织纹螺 <i>Nassarius siquinjorensis</i>	31	1	-17.39 \pm 0	7.03 \pm 0
	脉红螺 <i>Rapana venosa</i>	61~63	3	-16.14 \pm 0.84	6.03 \pm 0.43
	紫贻贝 <i>Mytilus edulis</i>	61~78	5	-17.17 \pm 0.41	4.94 \pm 0.73

Preliminary study on the food web and potential carbon sources of main consumers in Zhongjieshan Islands sea area in Zhoushan, Zhejiang

Yang Fan^{1,2}, Yin Rui², Fan Jiangtao³, Jiang Rijin², Xiao Yi^{1,2}, Wang Jing^{1,2}, Xu Hanxiang^{1,2}, Liu Mingzhi^{1,2}

(1. Marine and Fishery Institute, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316021, China; 2. Key Laboratory of Sustainable Utilization of Technology Research for Fisheries Resources of Zhejiang Province, Scientific Observation and Experimental Station of Fishery Resources of Key Fishing Grounds, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Zhejiang Marine Fisheries Research Institute, Zhoushan 316021, China; 3. South China Sea Fisheries Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China)

Abstract: In order to understand the characteristics of food web structure in Zhongjieshan Islands, consumer samples of fish, shrimp and crabs, cephalopods, shellfish and zooplankton were collected from Zhongjieshan Islands in July 2020. Based on the carbon and nitrogen stable isotope techniques, the contributions of the four potential carbon sources (macroalgae, phytoplankton, suspended particulate organic matter (POM) and substrate organic matter (SOM)) to consumers, as well as the food web structure and nutritional relationship of the Zhongjieshan Islands were analyzed. The results revealed that the $\delta^{13}\text{C}$ values of carbon sources ranged from -22.93‰ to -9.73‰, and the $\delta^{15}\text{N}$ values ranged from 1.72‰ to 7.68‰. The $\delta^{13}\text{C}$ values of consumers ranged from -21.95‰ to -12.55‰,

and the $\delta^{15}\text{N}$ values of consumers ranged from 4.13‰ to 12.92‰. One-way analysis of variance showed that there were significant differences in carbon and nitrogen stable isotopes among different carbon sources and different groups of consumers ($p < 0.01$). SIBER model was used to analyze the trophic structure indexes of the regional ecosystem of Zhongjieshan Islands. Compared with the research results of other sea areas, it was found that the level of food source diversity (CR), trophic level length (NR) and total niche area (TA) were relatively high. SIAR model was used to calculate the carbon source contribution rate. The results showed that phytoplankton and POM were important carbon sources, with an average contribution rate of 29.63% and 28.72%. The maximum contribution rate of phytoplankton to zooplankton was 80.58%, and the maximum contribution rate of POM to fish was 79.74%; the maximum contribution rate of SOM to shrimp and crab was 49.94%; the carbon source contribution of macroalgae to consumers was the lowest, with an average of 18.37%. The mean trophic level range of the main consumers in Zhongjieshan Islands was 1.58 to 3.63, and the trophic level was 3. The average trophic level from big to small was as follows of cephalopods (3.09), fish (3.00), shrimps and crabs (2.70), shellfish (1.82). The consumers in the waters of Zhongjieshan Islands were mainly low and intermediate carnivores, and there were few omnivores and high carnivores. This study initially constructed the ecosystem food web of Zhongjieshan Islands, which provided reference data for understanding the trophic structure in this area, and also provided theoretical information for further study of the ecosystem.

Key words: Zhongjieshan Islands; food web; potential carbon sources; trophic level