

DOI: 10.20103/j.stxb.202308031666

韩温诺, 李翌, 庞敏, 宫于琛, 吴忠迅, 张朝晖, 康丽娜, 张学雷, 王宗灵, 屈佩. 典型海湾与海岛近海脉红螺碳、氮稳定同位素特征差异. 生态学报, 2024, 44(10): 4244–4253.

Han W R, Li Z, Pang M, Gong Y C, Wu Z X, Zhang Z H, Kang L N, Zhang X L, Wang Z L, Qu P. Differences of carbon and nitrogen stable isotope of *Rapana venosa* between typical bays and offshore islands. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(10): 4244–4253.

典型海湾与海岛近海脉红螺碳、氮稳定同位素特征差异

韩温诺¹, 李 翌¹, 庞 敏^{2,3}, 宫于琛^{2,3}, 吴忠迅⁴, 张朝晖^{2,3}, 康丽娜⁵, 张学雷^{2,3}, 王宗灵^{2,3}, 屈 佩^{2,3,*}

1 中国环境监测总站, 北京 100012

2 自然资源部第一海洋研究所, 渤海海峡生态通道野外科学观测站, 生态环境科学与技术重点实验室, 青岛 266061

3 崂山实验室, 海洋生态与环境科学功能实验室, 青岛 266234

4 长岛国家海洋公园管理中心, 烟台 265899

5 蓝智海洋生态技术研究中心, 北京 102206

摘要:为深入了解不同大小脉红螺(*Rapana venosa*)的碳、氮稳定同位素特征,探究其在典型海湾和海岛水域生态系统所处营养位置,于2022年春季和夏季在胶州湾和长岛近海通过拖网和潜水采集160个脉红螺样本,详细分析了不同体长、体重脉红螺的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 变化,并计算各研究区域的脉红螺核心生态位宽度及相关参数。结果显示,脉红螺 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围在 -22.12‰ — -16.63‰ ,四组数据均值为 -19.74‰ — -17.42‰ , $\delta^{15}\text{N}$ 值范围在 8.77‰ — 13.48‰ ,均值为 9.64‰ — 12.81‰ ,各组数据营养级均值在2.63—3.57;胶州湾春季脉红螺 $\delta^{13}\text{C}$ 值与体长、体重呈显著负相关,夏季呈显著正相关,长岛近海区域无明显变化,表明不同季节和不同区域的食物多样性水平存在差异,胶州湾脉红螺 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 的变化更为突出;两个研究区域 $\delta^{15}\text{N}$ 值和营养级与体长、体重呈显著正相关,主要由于脉红螺摄食偏好性差异,较大的脉红螺倾向于摄食高营养级生物,造成营养级较高。此外,胶州湾脉红螺营养级高于长岛近海,表明其 ^{15}N 来源更为广泛。营养生态位总面积、 $\delta^{15}\text{N}$ 差值、 $\delta^{13}\text{C}$ 差值、校正后标准椭圆面积等评价指标,揭示了不同区域、不同季节的脉红螺稳定同位素营养生态位的显著差异,反映了区域地理位置与食物来源对脉红螺 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的影响。上述研究结果为近海生态系统食物网的构建提供了重要数据,并为区域生物资源的管理和生态系统修复工作提供了科学支撑。

关键词:胶州湾;长岛近海;脉红螺;稳定同位素

Differences of carbon and nitrogen stable isotope of *Rapana venosa* between typical bays and offshore islands

HAN Wennuo¹, LI Zhao¹, PANG Min^{2,3}, GONG Yuchen^{2,3}, WU Zhongxun⁴, ZHANG Zhaohui^{2,3}, KANG Lina⁵, ZHANG Xuelei^{2,3}, WANG Zongling^{2,3}, QU Pei^{2,3,*}

1 China National Environmental Monitoring Centre, Beijing 100012, China

2 First Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Observation and Research Station of Bohai Strait Eco-Corridor, Key Laboratory of Eco-environmental Science and Technology, Qingdao 266061, China

3 Laoshan Laboratory, Marine Ecology and Environmental Science Laboratory, Qingdao 266234, China

4 Changdao National Marine Park Management Center, Yantai 265899, China

基金项目:山东省自然科学基金(ZR2022MD027, ZR2021MD014);崂山实验室项目(LSKJ202203902);蔚蓝星球基金项目(POOPFO00678)

收稿日期:2023-08-03; **网络出版日期:**2024-02-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: qupei@fio.org.cn

5 Lanzhi Ocean Ecological Technology Research Center, Beijing 102206, China

Abstract: This paper aims to understand the carbon and nitrogen stable isotope characteristics of *Rapana venosa* across various sizes, in order to gain insights into the nutrient dynamics within a typical bay and island water ecosystem. A total of 160 samples were collected through trawling and diving activities conducted in the Jiaozhou Bay and Changshan Archipelago offshore regions during the spring and summer of 2022. In this study, we conducted an analysis of the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ isotopic values of *R. venosa* individuals, taking into account variations in body length and weight. Additionally, we calculated the core niche breadth and other related parameters for each specific research area. The findings revealed that the $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ values of *R. venosa* exhibited a range of -22.12‰ to -16.63‰ and 8.77‰ to 13.48‰ , respectively. The mean values for these isotopic ratios were determined to be -19.74‰ to -17.42‰ and 9.64‰ to 12.81‰ , respectively. The mean trophic level of *R. venosa* varied between 2.63 and 3.57 across different size classes. In spring, a notable negative correlation was observed between the $\delta^{13}\text{C}$ values and the body length and weight of *R. venosa* collected from Jiaozhou Bay, whereas a significant positive correlation was found in summer. In contrast, negligible fluctuations were detected in the samples obtained from the offshore regions of the Changshan Archipelago. The findings indicate variations in food diversity across different seasons and geographic areas. The variations in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ were more conspicuous within Jiaozhou Bay. In addition, a noteworthy positive association was observed between the $\delta^{15}\text{N}$ values and trophic level, as well as body length and weight, in both regions under investigation. This correlation can primarily be attributed to the divergent feeding preferences of *R. venosa*, whereby larger individuals tend to consume organisms from higher trophic levels, resulting in an elevated trophic level. Furthermore, the *R. venosa* exhibited a higher trophic level in Jiaozhou Bay compared to offshore in Changshan Archipelago, indicating the extensive food sources and more abundant enrichment pathway of ^{15}N . The study elucidated the discernible variations in stable isotope trophic niches across different regions and seasons, as evidenced by the evaluation indexes encompassing total area (TA), $\delta^{15}\text{N}$ range, $\delta^{13}\text{C}$ range, and corrected standard ellipse area. These findings underscore the impact of geographical location and food source on the isotopic compositions of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ in *R. venosa*. Consequently, this research furnishes fundamental data support for the establishment of food webs in coastal ecosystems, while also offering scientific backing for regional biological resource management and ecosystem restoration.

Key Words: Jiaozhou Bay; Changshan Archipelago; *Rapana venosa*; stable isotope

近几十年来,稳定同位素技术已广泛应用于水域生态系统物质循环和能量流动研究,为揭示食物网结构和生态系统功能变化提供了重要手段^[1-3],特别是碳和氮稳定同位素(^{13}C 和 ^{15}N)已成为食物网研究的主要测定指标。当捕食者摄食不同碳源的食物时,其 ^{13}C 组成与食源基本相似(富集度在 $0-1\text{‰}$);而在食物链中, ^{15}N 在不同营养级间富集度不同($3\text{‰}-5\text{‰}$),其 ^{15}N 含量越高,相对应的营养级越高^[4]。因此,碳、氮稳定同位素常被用来研究生物在生态系统中的食物来源及所处营养位置^[5-7],同时也衍生出诸多分析模式。Newsome等^[8]在传统生态位基础上提出了稳定同位素营养生态位(Stable isotope trophic niche),将其定义为以同位素值(δ 值)作为 δ 空间中坐标的区域,同时越来越多的研究者应用稳定同位素营养生态位研究水域生态系统食物利用情况和种间营养关系,反映生态系统生物多样性水平和营养结构^[9-11]。

胶州湾和长岛近海是两个生态和地理特征显著的水域,具有丰富的渔业资源,但由于地理位置差异,海湾和海岛水体交换能力不同,水域生态系统中营养物质输入存在较大差异。胶州湾是典型的半封闭型海湾,受人类活动影响较大,城市港口交通、沿海工程建设、生物资源开发、以及工农业的迅速发展,造成水域污染和富营养化^[12-13]。长岛近海位于黄渤海交汇处,为开阔型海岛,主要受自然环境变化影响较大^[14]。两种水域生态系统食物网营养结构也形成鲜明对比^[15-17],之前相关的生物资源调查研究发现胶州湾生物以鱼类居多,生物量占比过半,其次是虾类、蟹类和头足类,总体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值范围介于 -25.63‰ — -17.16‰ 之间, $\delta^{15}\text{N}$ 介于 4.15‰ — 14.11‰ 之间^[15];长岛近海鱼类生物量占比接近40%,其次是头足类、蟹类和虾类, $\delta^{13}\text{C}$ 值范围介于

-26.54‰—-15.10‰之间, $\delta^{15}\text{N}$ 介于 0.38‰—14.54‰之间^[14]。脉红螺作为这两个区域的指示物种,其生物体 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 受所处环境、食物来源、生长状态等因素的影响,研究脉红螺稳定同位素特征有助于了解其食物来源及营养层次,指示生态系统食物网营养结构,从而更有效地开展海洋生态保护和恢复^[18–19]。到目前为止,众多学者对脉红螺的繁殖、摄食习性、毒理以及稳定同位素营养生态位等进行了深入研究^[20–22],但有关脉红螺随体长和体重变化的碳和氮稳定同位素差异仍未见报道。本研究通过比较胶州湾和长岛近海区域脉红螺碳、氮稳定同位素特征差异,探讨不同区域和季节脉红螺所处营养位置和食物来源差异,为预测脉红螺对水域生态系统影响及构建区域生态系统食物网结构提供基础数据支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集

实验样品采自 2022 年春季(2 月底—3 月初)和 2022 年夏季(7 月),在胶州湾和长岛近海区域共设置 10 个采样点位并利用拖网和潜水采集获得,采样区域和点位见图 1。样品采集水层的温度、水深等参数由 CTD (美国 SeaBird) 获取。所获得 160 个脉红螺样本置于 -20℃ 冷冻保存至实验室分析。为探究 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 与脉红螺体长和体重、区域、季节的变化关系,将样品按照区域和季节分为胶州湾春季、胶州湾夏季、长岛近海春季和长岛近海夏季四组数据。

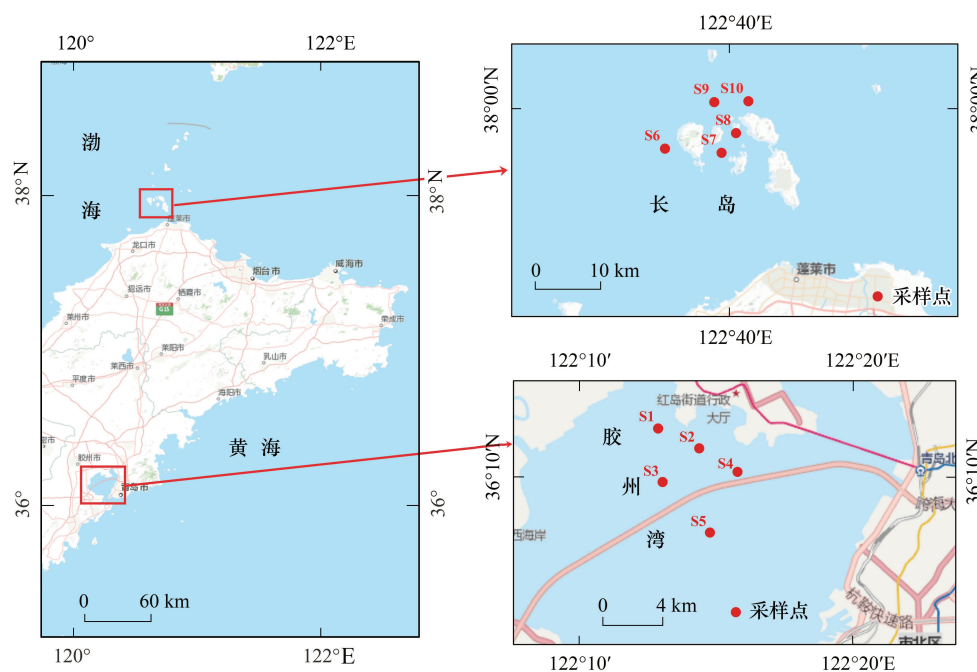


图 1 样品采集区域及采样点

Fig.1 Surveyed area and sampling sites

1.2 样品处理

实验室中,分别利用游标卡尺和电子天平对脉红螺体长(mm)和体重(g)进行测定。去除脉红螺外壳,取其肌肉组织,将样品放于烘箱中 60℃ 下烘干至恒重,使用研钵研磨成均匀粉末后过 60 目筛网,于干燥器中保存,用于后续碳、氮稳定同位素比值测定。

1.3 碳和氮稳定同位素分析

1.3.1 碳和氮稳定同位素测定

利用百万分之一天平准确称取约 0.5 mg 混合均匀的粉末样品,用 4 mm×6 mm 锡杯包样,用元素分析仪—稳

定同位素质谱仪联机(Flash EA 1112 HT-Delta V Advantages, Thermo FisherTM, Germany)测定样品中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值。测定过程中,仪器载气流速 90 mL/min,反应管温度 960℃,色谱柱温度 50℃。C 和 N 标准参考物质分别对应于国际标准物质 VPDB(Vienna Pee Dee Belemnite)和空气中的氮气, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 按以下公式^[23]计算:

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

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

式中, $(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sample}}$ 、 $(^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{sample}}$ 为样品所测得的同位素比值, $(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{standard}}$ 、 $(^{15}\text{N}/^{14}\text{N})_{\text{standard}}$ 为标准物质的同位素比值, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的分析精度分别为 $\pm 0.20\text{‰}$ 和 $\pm 0.25\text{‰}$ 。

1.3.2 营养级计算

营养级的计算公式为:

$$TL = [(\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}} - \delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}) / \Delta^{15}\text{N}_{\text{TEF}}] + TL_{\text{baseline}} \quad (3)$$

式中, TL 表示物种的营养级, $\delta^{15}\text{N}_{\text{consumer}}$ 表示捕食者的氮稳定同位素比值, $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 表示参照基准生物的氮稳定同位素比值, $\Delta^{15}\text{N}_{\text{TEF}}$ 为相邻营养级间氮稳定同位素富集度, TL_{baseline} 为基准生物营养级,本研究 $\delta^{15}\text{N}_{\text{baseline}}$ 取浮游动物整体平均值为 7.49‰ ^[15], $\Delta^{15}\text{N}_{\text{TEF}}$ 参考常用富集度数值 3.4‰ ^[7],以浮游动物作为基准生物, TL_{baseline} 取值为 2。

1.3.3 稳定同位素营养生态位确定

在生态系统营养结构研究中,分析稳定同位素营养生态位宽度和重叠的方法较多,本研究依据 Jackson 等^[24]提出的营养生态位总面积(total area, TA)、 $\delta^{15}\text{N}$ 差值($\delta^{15}\text{N}$ range, NR)、 $\delta^{13}\text{C}$ 差值($\delta^{13}\text{C}$ range, CR)、校正后标准椭圆面积(corrected standard ellipse area, SEAc) 4 个营养生态位宽幅评价指标来比较不同区域、不同季节的脉红螺稳定同位素营养生态位差异。TA、SEAc、NR、CR 是根据测定的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 稳定同位素比值,利用 R 软件 SIAR 数据包计算得到^[25]。TA 为营养生态位总面积,代表物种在食物网中营养多样性的总程度。但 TA 容易受到个体极端值的影响,故以 SEAc 表示。CR 是物种碳稳定同位素差值,表示食物来源广泛性。NR 是物种氮稳定同位素差值,表示营养级跨度或食物链长度。

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \text{cov}(x, y) \\ \text{cov}(y, x) & \sigma_y^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\text{SEA} = \pi ab \quad (5)$$

$$\text{SEAc} = -\text{SEA}(n-1)(n-2)^{-1} \quad (6)$$

在计算 SEAc 过程中以协方差矩阵(式(4))构造标准椭圆,该协方差矩阵定义了其形状和大小,以及定义其位置的 x 和 y 平均值, σ_x^2 、 σ_y^2 分别表示 x 和 y 的总体方差,并以此绘制标准椭圆,得到的标准椭圆的面积(SEA)如式(5)所示, a 为椭圆长半轴, b 为椭圆短半轴。采用校正标准椭圆面积(SEAc)可减少因样本数较少而产生的误差,公式如式(6)所示, n 为样本量。

1.4 数据处理

碳、氮稳定同位素结果数据用平均值 $\pm$ 标准差表示,利用单因素方差分析(ANOVA),分别对两个研究区域和季节的脉红螺 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值进行显著性差异检验,设定差异显著性水平 P 为 0.05,当 $P < 0.05$ 时,差异显著;当 $P < 0.01$ 时,差异极显著。利用线性回归对 4 组数据的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值与体长、体重进行相关性分析。数据统计分析与制图在 Origin 9.0 和 Excel 中完成。

2 结果

2.1 脉红螺 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 特征

脉红螺四组数据(胶州湾春季、夏季和长岛近海春季、夏季)结果显示(表 1),胶州湾春季脉红螺 $\delta^{13}\text{C}$ 平

均值为 $(-17.42 \pm 0.77)\text{‰}$, $\delta^{15}\text{N}$ 值为 $(12.81 \pm 0.35)\text{‰}$, 均显著高于其他各组数据。胶州湾夏季脉红螺 $\delta^{13}\text{C}$ 均值与长岛近海春季基本一致, 而 $\delta^{15}\text{N}$ 值显著偏高; 长岛近海夏季数据 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值均处于最低。从 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 范围来看, $\delta^{13}\text{C}$ 值变化幅度胶州湾春季>胶州湾夏季>长岛近海春季=长岛近海夏季, $\delta^{15}\text{N}$ 值变化幅度胶州湾春季>长岛近海夏季>胶州湾夏季>长岛近海春季。利用单因素方差分析发现, 脉红螺在不同区域、不同季节 $\delta^{13}\text{C}$ 值 ($F=134.42, P<0.01$) 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值 ($F=745.10, P<0.01$) 变化差异极显著。

表 1 胶州湾、长岛近海春季和夏季脉红螺稳定同位素比值 ($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$)

Table 1 Stable isotope ratios ($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$) of *R. venosa* in Jiaozhou Bay and Changdao coastal in spring and summer

区域 Region	季节 Season	样本数 Sample size	体长/mm Body length (Mean±SD)	体重/g Body weight (Mean±SD)	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$		$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$	
					范围 Range	均值 Mean±SD	范围 Range	均值 Mean±SD
胶州湾	春	47	65.81±10.65	47.53±26.86	-22.12—-16.63	-17.42±0.77	11.43—13.48	12.81±0.35
Jiaozhou bay	夏	63	62.36±9.00	34.49±23.39	-19.90—-17.82	-19.00±0.45	11.27—12.59	12.09±0.29
长岛近海	春	15	82.25±8.03	116.21±32.57	-19.75—-18.04	-19.01±0.41	9.80—10.95	10.18±0.32
Changdao coastal water	夏	35	77.73±7.89	88.05±28.14	-20.68—-18.98	-19.74±0.38	8.77—10.43	9.64±0.38

2.2 脉红螺 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 变化

采集到的胶州湾脉红螺体长范围在 42.07—90.52 mm 之间, 平均值 (63.84 ± 9.85) mm, 体重范围在 9.42—129.00 g 之间, 平均值为 (40.06 ± 25.65) g; 长岛近海脉红螺体长范围在 61.03—104.01 mm 之间, 平均值 (79.09 ± 8.12) mm, 体重范围在 22.90—188.60 g 之间, 平均值为 (96.50 ± 31.98) g。胶州湾春季和夏季 $\delta^{13}\text{C}$ 值与体长、体重显著相关 ($P<0.05$, 表 2), 春季 $\delta^{13}\text{C}$ 值随体长、体重增加呈现降低趋势, 夏季呈现出升高趋势; 长岛近海春季和夏季 $\delta^{13}\text{C}$ 值与体长、体重无显著相关性, $\delta^{13}\text{C}$ 值变化趋势不明显 (图 2)。四组样本数据中脉红螺 $\delta^{15}\text{N}$ 值与体长、体重均显著相关 ($P<0.05$), 且随体长、体重增加, $\delta^{15}\text{N}$ 值呈现升高趋势。

表 2 胶州湾、长岛近海春季和夏季脉红螺 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 变化差异

Table 2 The variation of $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ values for *R. venosa* in Jiaozhou Bay and Changdao coastal water in spring and summer

生长指标 Growth index	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$				$\delta^{15}\text{N}/\text{‰}$			
	胶州湾		长岛近海		胶州湾		长岛近海	
	Jiaozhou Bay		Changdao coastal water		Jiaozhou Bay		Changdao coastal water	
	春季 Spring	夏季 Summer	春季 Spring	夏季 Summer	春季 Spring	夏季 Summer	春季 Spring	夏季 Summer
体长 Body length	0.346 *	0.372 **	0.078	0.076	0.618 **	0.546 **	0.673 **	0.465 **
体重 Weight	0.318 *	0.709 **	0.143	0.106	0.642 **	0.662 **	0.731 **	0.570 **

* 表示显著相关 ($P<0.05$), ** 表示极显著相关 ($P<0.01$)

2.3 脉红螺稳定同位素营养生态位

脉红螺稳定同位素营养生态位结果显示 (图 3), 胶州湾春季在 $\delta^{13}\text{C}$ — $\delta^{15}\text{N}$ 坐标系中处于较高位置, 其次为胶州湾夏季, 胶州湾春季 CR 和 SEA_c 指标结果高于其他 3 组数据 (表 3)。从季节变化来看, 胶州湾春季 CR 值大于夏季。长岛近海区域春季和夏季 CR 变化幅度一致。两个研究区域不同季节脉红螺稳定同位素营养生态位存在较明显偏移, 有部分面积重叠, 表明脉红螺食物来源存在季节性差异。从区域变化来看, 胶州湾脉红螺稳定同位素营养生态位高于长岛近海, 两个区域间脉红螺稳定同位素营养生态位不存在任何程度的重叠。

2.4 脉红螺营养级

胶州湾和长岛近海两个研究区域脉红螺营养级介于 2.38 至 3.76 之间, 胶州湾区域脉红螺营养级平均为 3.44, 长岛近海区域营养级平均为 2.68。脉红螺营养级在两个区域、两个季节间存在显著差异 ($F=742.07, P<0.05$), 表现为胶州湾高于长岛近海, 且两个区域春季的营养级均高于夏季 (表 4)。从生长变化来看, 随体长和体重增加, 脉红螺营养级呈现升高趋势 (图 4)。

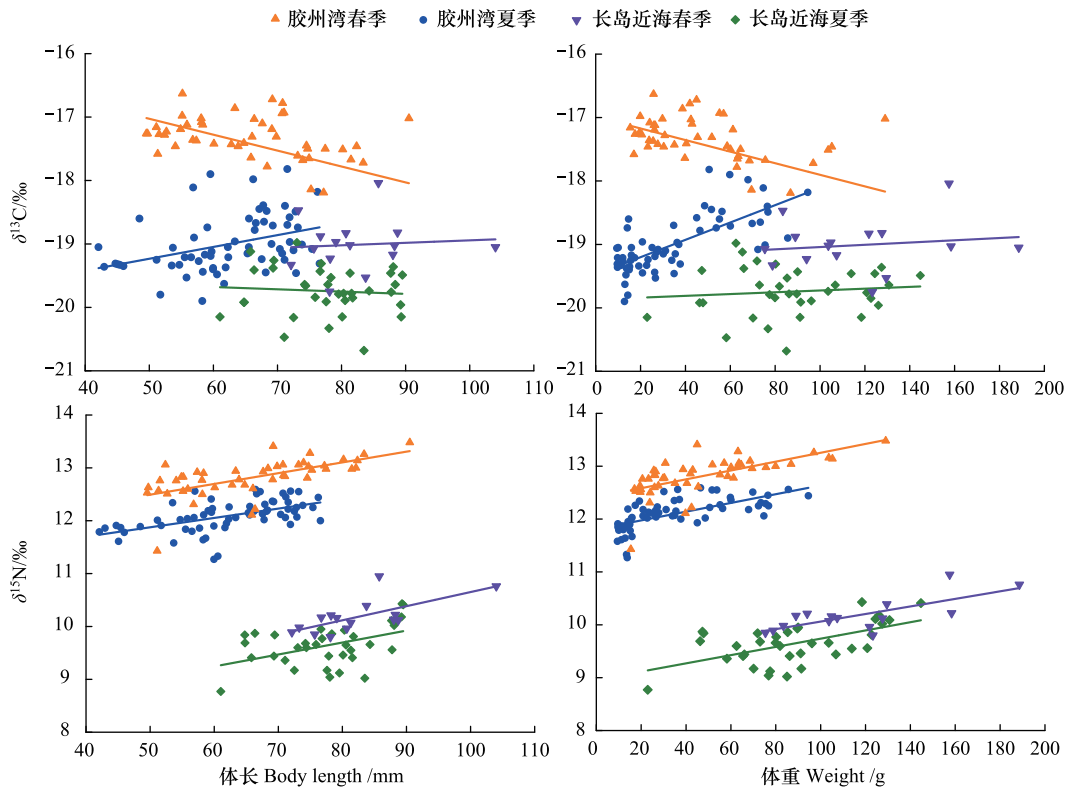


图 2 胶州湾、长岛近海春季和夏季脉红螺 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 值变化

Fig.2 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ values of *R. venosa* in Jiaozhou Bay and Changdao coastal water in spring and summer

表 3 胶州湾、长岛近海春季和夏季脉红螺的稳定同位素营养生态位指标

Table 3 Isotopic trophic niche index of *R. venosa* in Jiaozhou Bay and Changdao coastal water in spring and summer

类别 Classification	营养生态位总面积 TA	$\delta^{13}\text{C}$ 变幅 CR	$\delta^{15}\text{N}$ 变幅 NR	校正标准椭圆面积 SEA_c
胶州湾春季 Jiaozhou bay spring	5.723	5.49	2.05	0.863
胶州湾夏季 Jiaozhou bay summer	1.485	2.08	1.32	0.363
长岛近海春季 Changdao coastal spring	1.131	1.71	1.15	0.388
长岛近海夏季 Changdao coastal summer	1.726	1.70	1.66	0.428

TA:营养生态位总面积 Total area; CR: $\delta^{13}\text{C}$ 变幅 $\delta^{13}\text{C}$ range; NR: $\delta^{15}\text{N}$ 变幅 $\delta^{15}\text{N}$ range; SEA_c :校正标准椭圆面积 Corrected standard ellipse area

表 4 胶州湾、长岛近海春季和夏季脉红螺营养级

Table 4 Trophic levels of *R. venosa* in Jiaozhou Bay and Changdao coastal water in spring and summer

类别 Classification	营养级 Trophic levels	标准差 Standard deviation	<i>F</i>
胶州湾春季 Jiaozhou bay spring	3.57	5.49	742.07
胶州湾夏季 Jiaozhou bay summer	3.35	2.08	
长岛近海春季 Changdao coastal spring	2.79	1.71	
长岛近海夏季 Changdao coastal summer	2.63	1.70	

3 讨论

3.1 脉红螺 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 特征

胶州湾春季 $\delta^{13}\text{C}$ 随体长、体重增加而降低,而夏季呈现相反趋势。结合前期文献,我们推断产生这一现

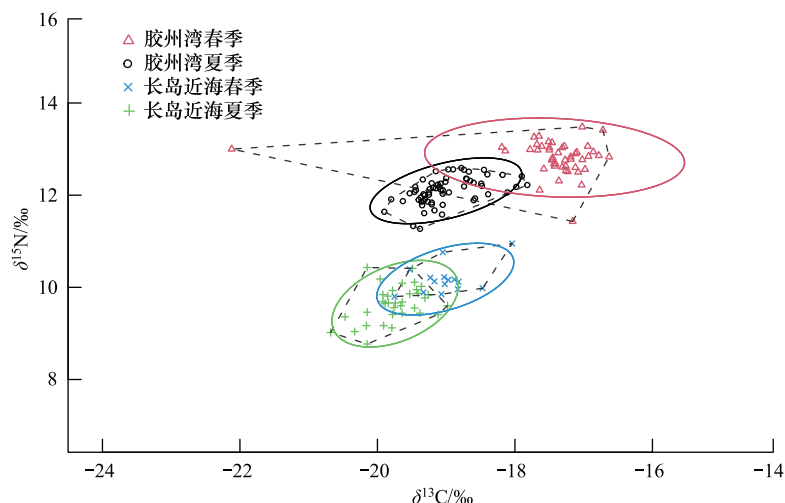


图3 胶州湾、长岛近海春季和夏季脉红螺稳定同位素营养生态位

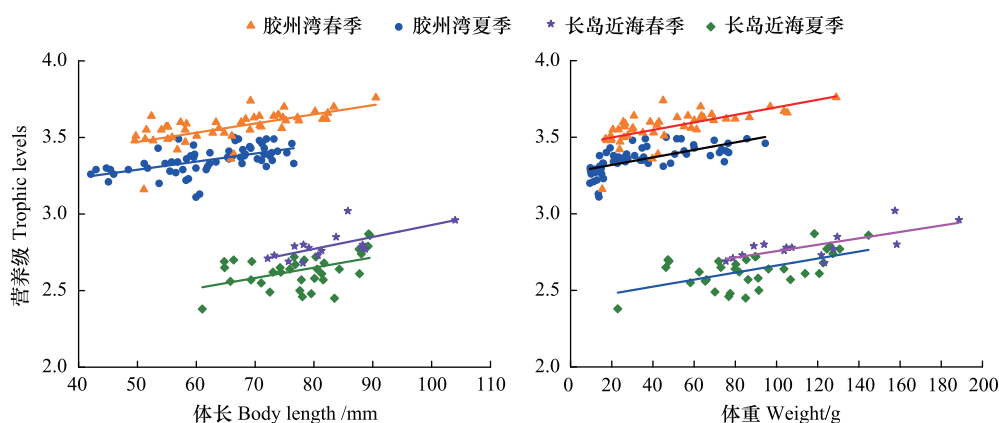
Fig.3 Isotopic trophic niche of *R. venosa* in Jiaozhou Bay and Changdao coastal water in spring and summer

图4 胶州湾、长岛近海春季和夏季脉红螺营养级变化

Fig.4 Trophic levels of *R. venosa* in Jiaozhou Bay and Changdao coastal water in spring and summer

象的主要原因是春季、夏季食物多样性水平不同,不同大小生物体摄食偏好性和摄食量存在差异,导致 $\delta^{13}\text{C}$ 特征值差异^[26]。张传鑫等^[27]在研究底栖生物食源贡献率时发现,脉红螺属于杂食性生物,碳源中双壳类、浮游植物和沉积物有机质贡献率较高,而食物来源变化会造成 $\delta^{13}\text{C}$ 值差异。因此,脉红螺作为一种摄食结构复杂的生物,可以有效的指示当地食物网结构和生物食物来源的情况。

四组数据中, $\delta^{15}\text{N}$ 值与体长、体重均呈现出正相关性,符合海洋生物粒径谱规律。海洋生物粒径谱是按照生物个体大小将某一生态系统内所有生物划分为不同粒级,粒级间存在的捕食与被捕食构成能量流动^[28],生物体粒径越大其所处营养级位置越高^[29],脉红螺符合生物粒径谱特征,个体较大的生物具有相对更高的营养级。随脉红螺体长、体重增加,氮稳定同位素显著升高,也预示着体长和体重更大的脉红螺在食物网结构中营养层次更高。脉红螺摄食方式、摄食偏好性与体长大小有一定关系,尤其对壳薄而脆的猎物(蜃蛭、竹节蛭等)具有偏好性^[21],较小的脉红螺主要摄食一些营养级较低的小型生物, $\delta^{15}\text{N}$ 特征值相对较低;相反较大的脉红螺会摄食体型较大的生物,通过包裹贝类使其窒息,分泌的粘液将贝肉变成可摄食状态,以获取较高的能量, $\delta^{15}\text{N}$ 特征值相对较高。这与捕食者趋向于捕食较大个体饵料,从而最大限度的获得能量的结论一致^[30],摄食对象的 $\delta^{15}\text{N}$ 值不同,是造成不同大小脉红螺 $\delta^{15}\text{N}$ 值差异的主要原因^[31-32]。

3.2 脉红螺稳定同位素营养生态位

生态位是反映物种在生态系统中所占据的空间位置以及对环境的适应性^[33]。基于该理论的稳定同位素营养生态位能够反映某一物种在生态系统中的食物来源广泛性和营养层次,对于研究物种在生态系统中的食物来源和在食物网中的营养位置起重要作用^[34]。稳定同位素营养生态位参数中,TA 和 SEA_c代表物种在食物网中营养多样性的总体范围,CR 值和 NR 值分别反映了物种食物来源的多样性和营养层次^[11,24]。吕红健等^[35]研究表明稳定同位素营养生态位差异体现在饵料生物来源,摄食范围与摄食量等多个因素,广泛的食物来源会造成¹³C 变幅差异,¹⁵N 富集途径增多,生物营养级升高。胶州湾脉红螺 NR 值高于长岛近海区域,说明两区域间存在不同的食物来源范围和营养级跨度,但由于长岛近海春季采集到的样品数量较少,存在样本误差增大的风险。已报道的研究中,胶州湾区域底栖生物如菲律宾蛤仔、蛭蛭和牡蛎丰度和生物量较高^[36-37],可供脉红螺摄食的底栖贝类种类和生物量高于长岛近海区域^[38],此外,胶州湾因其相对封闭的海湾环境,人类活动和水产养殖密集,主要受河流和排污口等陆源输入的影响,湾内有机质含量较高^[39],这与^{δ¹⁵N}值较高的结论一致。两个区域间脉红螺稳定同位素营养生态位不存在任何程度的重叠,表明两个典型区域脉红螺栖息环境和生物多样性水平不同,以及两区域生态系统食物网营养结构存在差异^[15,40]。

3.3 脉红螺 ^{δ¹³C} 的空间和季节差异

^{δ¹³C} 在各营养级间的分馏较低,并且生物体在生长过程中 ^{δ¹³C} 特征会向食物源同位素特征不断接近^[4-5,41],因此通常将其用于指示消费者的潜在食物源。本研究发现,在胶州湾和长岛近海区域脉红螺 ^{δ¹³C} 值存在显著的区域差异性 ($P < 0.05$),与胶州湾区域相比,长岛近海区域 ^{δ¹³C} 值偏低,且跨度较小。长岛近海区域脉红螺 ^{δ¹³C} 值与 2016 年张智鹏^[42] 在小黑山岛进行的同位素测定结果 (-18.93 ± 0.51)‰ 相近;而胶州湾则明显偏高,与 2011 年麻秋云^[15] 在构建胶州湾食物网中蟹类 ($-19.50\text{‰} \sim -17.16\text{‰}$) 基本一致,表明胶州湾区域脉红螺食物来源更广泛且趋向于摄食更高营养级食物源。此外,胶州湾是典型的菲律宾蛤仔养殖基地^[43],相比于长岛近海,较多的养殖活动为胶州湾提供了大量的碳源,为脉红螺提供了更多的食物。因此,不同区域食物源种类和生物量也是导致 ^{δ¹³C} 值差异的原因之一。

不仅仅是食物来源的种类和生物量,水体营养物质、水文特征等生境条件不同也会显著影响 ^{δ¹³C} 值变化^[44-46]。胶州湾属于半封闭型海湾,周边有多条河流汇入,海湾沿岸人类活动密集,陆源输入成为胶州湾区域营养物质的主要输入方式^[39]。地表径流携带大量含碳、氮类有机物质进入湾内,导致海水中营养物质含量增加;海湾区域水流速度较慢,有机物迁移转化作用降低,也会造成水体有机质升高^[13,47]。而长岛近海位于黄海、渤海交汇处,海域宽阔,受人类生产活动影响较小,陆生碳、氮源输入较少^[14],输入到水体中的有机物质会通过浮游动植物消耗吸收、或沉降形成沉积物、或微生物降解等方式进入食物网,造成 ^{δ¹³C} 在食物链中的传递和富集出现显著差异^[39]。此外,四组样本数据中 ^{δ¹³C} 值存在显著季节性差异,整体表现为春季高于夏季。班绍君^[22] 通过研究外部环境条件对脉红螺摄食影响发现,当水温低于 7℃,脉红螺摄食量降低,当水温高于 16℃ 时,摄食量明显增加。胶州湾和长岛近海春季平均水温在 5℃,夏季在 25℃,与赵瑞等^[38] 研究结果基本一致。春季水温降低会导致生物体对环境碳、氮元素的吸收转化效率降低^[48],也是造成 ^{δ¹³C} 值季节性差异的原因之一。

3.4 脉红螺 ^{δ¹⁵N} 的空间和季节差异

^{δ¹⁵N} 在相邻营养级间有显著且相对稳定的分馏,能够反映生态系统中生物体长期的摄食特征,通常被用来反映生物在食物网结构中所处营养级^[4,49]。本研究四组数据营养级结果为胶州湾春季 > 胶州湾夏季 > 长岛近海春季 > 长岛近海夏季。脉红螺营养级存在明显空间和时间差异性,胶州湾区域显著高于长岛近海,相差 0.76 个营养级,进一步表明胶州湾区域脉红螺 ^{δ¹⁵N} 富集途径较多,食物来源充足^[36-37];人类活动产生的含¹⁵N 污染物排入水体,随食物链(网)向上传递到各营养级,导致 ^{δ¹⁵N} 值升高,也是造成区域差异原因之一^[39,50];由于脉红螺营养级随体长、体重增加而增加,表明营养级会受到生物个体大小影响,脉红螺生长过程中摄食偏好性和食物来源范围会显著影响营养级变化。张波等^[51] 发现崂山湾鱼类营养级与体长呈显著正相

关,符合生物粒径谱特征,与本研究脉红螺营养级与体长、体重呈正相关的研究结果一致。

从季节来看,春季脉红螺营养级高于夏季,但营养级相差不大(0.16—0.21)。春季水域温度偏低(5℃),不利于浮游生物等初级生产者生长^[52],脉红螺对于 $\delta^{15}\text{N}$ 富集度高的食物来源摄食占比更多,会导致春季脉红螺营养级偏高;春季水域表面温度低于底层温度,携带高 $\delta^{15}\text{N}$ 的表层水体下沉至底层^[53],生物体栖息环境中 $\delta^{15}\text{N}$ 增加,也易造成生物体 $\delta^{15}\text{N}$ 富集,出现脉红螺营养级季节性差异。

4 结论

本研究利用碳、氮稳定同位素方法分析了胶州湾和长岛近海区域脉红螺 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 的季节变化和生长差异,结果表明:(1)脉红螺的食物来源与其体长、体重有关,较大的个体更倾向于摄食高营养级生物;(2)胶州湾与长岛近海的脉红螺在 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 上存在显著差异,胶州湾的食物多样性和营养层次更为丰富;(3)两个区域脉红螺营养生态位宽幅变化不同,食物来源范围和营养级跨度差异主要受地理差异与营养物质输入等影响;(4) $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 的空间和季节差异与脉红螺的摄食范围和数量及生态系统营养结构紧密相关。鉴于海域生态的复杂性,未来研究需进一步探讨生态系统中的生物食性及所处营养位置,以更好地理解食物来源与近海食物网营养关系,为构建水域食物网结构提供基础数据支撑。

参考文献 (References):

- [1] Hoekman D, Bartrons M, Gratton C. Ecosystem linkages revealed by experimental lake-derived isotope signal in heathland food webs. *Oecologia*, 2012, 170(3): 735-743.
- [2] Middelburg J J. Stable isotopes dissect aquatic food webs from the top to the bottom. *Biogeosciences*, 2014, 11(8): 2357-2371.
- [3] Eddy T D, Bernhardt J R, Blanchard J L, Cheung W W L, Colléter M, du Pontavice H, Fulton E A, Gascuel D, Kearney K A, Petrik C M, Roy T, Rykaczewski R R, Selden R, Stock C A, Wabnitz C C C, Watson R A. Energy Flow Through Marine Ecosystems: Confronting Transfer Efficiency. *Trends in Ecology & Evolution*, 2021, 36(1): 76-86.
- [4] Zanden M J V, Rasmussen J B. Variation in $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ trophic fractionation: Implications for aquatic food web studies. *Limnology and Oceanography*, 2001, 46(8): 2061-2066.
- [5] Peterson B J, Fry B. Stable Isotopes in Ecosystem Studies. *Annual Review of Ecology & Systematics*, 1987, 18: 293-320.
- [6] DeNiro M J, Epstein S. Mechanism of Carbon Isotope Fractionation Associated with Lipid Synthesis. *Science*, 1977, 197(4300): 261-263.
- [7] Post D M. Using Stable Isotopes to Estimate Trophic Position: Models, Methods, and Assumptions. *Ecology*, 2002, 83(3): 703-718.
- [8] Newsome S D, Martinez del Rio C, Bearhop S, Phillips D L. A niche for isotopic ecology. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2007, 5(8): 429-436.
- [9] Zhao Y S, Yang T, Shan X J, Jin X S, Teng G L, Wei C. Stable Isotope Analysis of Food Web Structure and the Contribution of Carbon Sources in the Sea Adjacent to the Miaodao Archipelago (China). *Fishes*, 2022, 7(1): 32.
- [10] Wang Y, Ren L, Xu D H, Fang D A. Exploring the trophic niche characteristics of four carnivorous Cultrinae fish species in Lihu Lake, Taihu Basin, China. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 2022, 10: 954231.
- [11] Bearhop S, Adams C E, Waldron S, Fuller R A, Macleod H. Determining trophic niche width: a novel approach using stable isotope analysis. *Journal of Animal Ecology*, 2004, 73: 1007-1012.
- [12] Liu K, Xiao X T, Zhang D L, Ding Y, Li L, Zhao M X. Quantitative estimates of organic carbon contributions to the river-estuary-marine system in the Jiaozhou Bay, China. *Ecological Indicators*, 2021, 129: 107929.
- [13] Yuan Y, Song D H, Wu W, Liang S K, Wang Y, Ren Z P. The impact of anthropogenic activities on marine environment in Jiaozhou Bay, Qingdao, China: A review and a case study. *Regional Studies in Marine Science*, 2016, 8: 287-296.
- [14] 赵永松, 单秀娟, 杨涛, 金显仕, 韦超. 庙岛群岛毗邻海域秋季底栖食物网潜在碳来源贡献及对碳汇渔业的思考. *渔业科学进展*, 2022, 43(5): 132-141.
- [15] 麻秋云, 韩东燕, 刘贺, 薛莹, 纪毓鹏, 任一平. 应用稳定同位素技术构建胶州湾食物网的连续营养谱. *生态学报*, 2015, 35(21): 7207-7218.
- [16] 孙才志, 曹威威, 肖春柳. 长山群岛海洋渔业资源的平均营养级变化特征. *海洋通报*, 2019, 38(1): 87-95.
- [17] Zhang X P, Song H J, Zhuang H F, Yi S J, Hong X G, Chu J S, Zhang Z H. Calculating the carrying capacity of bivalve mariculture in the Changshan Archipelago (Bohai Strait, China): Ecopath modeling perspective. *Journal of Sea Research*, 2023, 192: 102367.
- [18] Nagelkerken I, Goldenberg S U, Ferreira C M, Ullah H, Connell S. Trophic pyramids reorganize when food web architecture fails to adjust to ocean change. *Science*, 2020, 369(6505): 829-832.
- [19] Qu P, Wang Q X, Pang M, Zhang Z P, Liu C Y, Tang X X. Trophic structure of common marine species in the Bohai Strait, North China Sea,

- based on carbon and nitrogen stable isotope ratios. *Ecological Indicators*, 2016, 66: 405-415.
- [20] 贺加贝, 纪翔, 徐莹莹, 王鹤, 常婧婷, 周广军, 刘蓬, 赵强. 3 月龄脉红螺表型性状对体质量影响效应分析. *海洋科学*, 2021, 45(11): 118-124.
- [21] 于瑞海, 安俊庭, 张扬, 孔静. 脉红螺对不同贝类摄食喜好性的研究. *海洋湖沼通报*, 2013(4): 61-65.
- [22] 班绍君. 外部条件对脉红螺(*Rapana venosa*)摄食和幼虫生长发育的影响[D]. 青岛: 中国科学院研究生院, 2013.
- [23] Tamelander T, Renaud P E, Hop H, Carroll M L, Ambrose W G J, Hobson K A. Trophic relationships and pelagic-benthic coupling during summer in the Barents Sea Marginal Ice Zone, revealed by stable carbon and nitrogen isotope measurements. *Marine Ecology Progress Series*, 2006, 310: 33-46.
- [24] Layman C A, Arrington D A, Montaña C G, Post D M. Can stable isotope ratios provide for community-wide measures of trophic structure? *Ecology*, 2007, 88(1): 42-48.
- [25] Jackson A L, Inger R, Parnell A C, Bearhop S. Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER-Stable Isotope Bayesian Ellipses in R. *Journal of Animal Ecology*, 2011, 80(3): 595-602.
- [26] 王晓玲, 徐东坡, 刘凯, 段金荣, 施伟纲. 太湖 3 个典型水域红鳍原鲈(*Cultrichthys erythropterus*) $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 值的变化规律. *湖泊科学*, 2015, 27(5): 925-931.
- [27] 张传鑫, 陈静, 纪莹璐, 陈琳琳, 李海汇, 王全超, 李宝泉, 邢荣莲. 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. *海洋学报*, 2022, 44(1): 89-100.
- [28] 袁亚楠, 邢美燕, 马小杰, 邢丽波, 狄婉茵. 水生生物粒径谱研究综述. *中国资源综合利用*, 2018, 36(11): 117-122.
- [29] Woodward G, Speirs D C, Hildrew A G. Quantification and Resolution of a Complex, Size-Structured Food Web. *Advances in Ecological Research*, 2005, 36: 85-135.
- [30] Hughes R. Optimal foraging theory in the marine context. *Oceanography and Marine Biology*, 1980, 18: 423-481.
- [31] 孙兆跃, 范瑞良, 隋延鸣, 唐保军, 姜伟, 修玉娜, 李楠楠, 李雪英, 全为民. 3 种无脊椎动物对近江牡蛎 *Crassostrea ariakensis* 和熊本牡蛎 *C. sikamea* 的捕食研究. *生态学报*, 2021, 41(7): 2895-2901.
- [32] Persson L. Feeding Ecology of Fish. *Trends in Ecology & Evolution*, 1995, 10(4): 177.
- [33] 康乐, 陈永林. 草原蝗虫营养生态位的研究. *昆虫学报*, 1994, 37(2): 178-189.
- [34] 张琥顺, 宋普庆, 郑新庆, 刘世刚, 李渊, 王雪华, 林龙山. 基于稳定同位素方法的东海南中部海域主要饵料生物营养生态位季节变动的研究. *应用海洋学学报*, 2022, 41(3): 375-385.
- [35] 吕红健, 杨丽亚, 付梅, 唐晓琪, 邓华堂, 张志新, 姚维志. 基于稳定同位素技术的三峡库区短颌鲚营养生态位特征研究. *生态学报*, 2022, 42(21): 8739-8750.
- [36] 张崇良, 任一平, 薛莹, 徐宾铎, 纪毓鹏. 胶州湾西北部潮间带冬季大型底栖动物丰度和生物量. *中国水产科学*, 2010, 17(3): 551-560.
- [37] 杨湘君, 崔雯瑶, 张蒙生, 陈晨, 于子山. 胶州湾大型底栖动物生态学初步研究. *海洋科学进展*, 2021, 39(1): 89-101.
- [38] 赵瑞. 长岛海域大型底栖动物生态学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2015.
- [39] 王猛, 王玉珏, 刘栋, 刘东艳, 刘珂, 张海龙, 肖晓彤. 胶州湾水体和表层沉积物营养环境现状及影响因素. *海洋学报*, 2022, 44(10): 49-62.
- [40] 赵永松. 庙岛群岛毗邻海域底栖食物网结构特征[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
- [41] Ben-David M, Flaherty E A. Stable isotopes in mammalian research: a beginner's guide. *Journal of Mammalogy*, 2012, 93(2): 312-328.
- [42] 张智鹏, 薛久亮, 王鸣岐, 刘海英, 史奇让, 宋静静, 赵文溪. 人工鱼礁区三种习见肉食性软体动物营养生态位研究. *海洋通报*, 2022, 41(5): 588-592.
- [43] 姜妮妮, 房景辉, 蔺凡, 杜美荣, 高亚平, 方建光, 蒋增杰. 胶州湾菲律宾蛤仔生态容量评估及其碳汇功能. *渔业科学进展*, 2022, 43(5): 61-71.
- [44] Kendall C, Silva S R, Kelly V J. Carbon and nitrogen isotopic compositions of particulate organic matter in four large river systems across the United States. *Hydrological Processes*, 2001, 15(7): 1301-1346.
- [45] Zhang Y, Ding S, Bentsen C N, Ma S Q, Jia X B, Meng W. Differences in stream fish assemblages subjected to different levels of anthropogenic pressure in the Taizi River catchment, China. *Ichthyological Research*, 2015, 62(4): 450-462.
- [46] 谢青, 徐勤勤, 王永敏, 孙涛, 樊宇飞, 刘伟豪, 王定勇. 三峡水库与长寿湖水库鱼类碳、氮稳定同位素特征及营养级的比较. *湖泊科学*, 2019, 31(3): 837-845.
- [47] 宋金明, 袁华茂, 李学刚, 段丽琴. 胶州湾的生态环境演变与营养盐变化的关系. *海洋科学*, 2020, 44(8): 106-117.
- [48] 蔡德陵, 张淑芳, 唐启升, 孙耀. 鲈鱼新陈代谢过程中的碳氮稳定同位素分馏作用. *海洋科学进展*, 2003, 21(3): 308-317.
- [49] Post D M. Individual Variation in the Timing of Ontogenetic Niche Shifts in Largemouth Bass. *Ecology*, 2003, 84(5): 1298-1310.
- [50] Anderson C, Cabana G. Does $\delta^{15}\text{N}$ in river food webs reflect the intensity and origin of N loads from the watershed? *Science of the Total Environment*, 2006, 367(2/3): 968-978.
- [51] 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.
- [52] 杨东方, 高振会, 孙培艳, 赵蓓, 李梅. 胶州湾水温和营养盐硅限制初级生产力的时空变化. *海洋科学进展*, 2006, 24(2): 203-212.
- [53] 牟新悦. 大亚湾和胶州湾悬浮颗粒有机物碳、氮同位素组成[D]. 厦门: 厦门大学, 2018.