

南海西部不同粒级浮游动物碳氮稳定同位素研究

张文博^{1,2}, 黄洪辉², 巩秀玉², 刘华雪²

(1.广东省环境科学研究院, 广东 广州 510045; 2.中国水产科学研究院 南海水产研究所, 广东 广州 510300)

摘要: 本文根据 2018 年夏季在南海西部海域采集的不同粒级浮游动物样品 (大型: >500 μm ; 中型: 380~500 μm ; 小型: 180~380 μm), 对其生物量、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 进行了分析研究。结果显示, 浮游动物生物量变化范围为 0.25~8.44 mg/m^3 , $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围为 -26.73‰~-14.84‰, $\delta^{15}\text{N}$ 变化范围为 3.44‰~8.40‰。受沿岸上升流及冷涡影响, 研究海域浮游动物生物量、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 的高值区多分布在中部和西部海域。浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 出现显著粒径结构差异, $\delta^{15}\text{N}$ 随浮游动物粒径增大而增加, 中型浮游动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 低于大型、小型浮游动物。各粒级浮游动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 呈现相似的空间分布特征, 高值区主要分布在中部和西部海域。相关性分析显示, 大型、小型浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 与生物量呈显著的正相关关系; 中型浮游动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 与生物量的相关性不明显。本研究可为南海西部海域食物网结构的研究提供基础材料。

关键词: 浮游动物; 生物量; 稳定同位素; 南海西部

中图分类号: Q178.53

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2025)01-0089-08

Study on carbon and nitrogen stable isotopes of size fractionated zooplankton in western South China Sea

ZHANG Wenbo^{1,2}, HUANG Honghui², GONG Xiuyu², LIU Huaxue²

(1. Guangdong Province Academy of Environmental Science, Guangzhou 510045, China; 2. South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China)

Abstract: Based on size fractionation zooplankton (>500 μm , 380-500 μm and 180-380 μm) samples collected in the western South China Sea in 2018 summer, biomass, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ were studied. The results show that the biomass of zooplankton ranged from 0.25 mg/m^3 to 8.44 mg/m^3 , the $\delta^{13}\text{C}$ of zooplankton ranged from -26.73‰ to -14.84‰, and the $\delta^{15}\text{N}$ of zooplankton ranged from 3.44‰ to 8.40‰. Due to the influence of coastal upwelling and cyclonic eddy, high values of zooplankton biomass and stable isotope appeared around the central and western in study area. The stable isotopes of carbon and nitrogen of zooplankton showed significant differences in particle size structure. The nitrogen stable isotopes of size-fractionated zooplankton generally increased from small to large size zooplankton, and the $\delta^{13}\text{C}$ of meso-zooplankton were significantly lower than micro-zooplankton and macro-zooplankton. The $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of size-fractionated zooplankton showed similar spatial distribution characteristic. And high values appeared around the central and western of the study area. The correlation analysis shows that stable nitrogen isotope of micro-zooplankton and macro-zooplankton were positively correlated with zooplankton biomass, while the stable carbon and nitrogen

收稿日期: 2023-11-29, 修订日期: 2024-03-27

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41706138); 农业农村部财政专项项目 (NFZX2021)

作者简介: 张文博 (1991—), 男, 安徽蚌埠人, 硕士, 工程师, 主要从事海洋生态学研究, E-mail: wenbozhang91@163.com

通信作者: 刘华雪 (1984—), 男, 山东济宁人, 博士, 研究员, 主要从事海洋生态学研究, E-mail: liuhuaxue@scafsri.ac.cn

isotope of meso-zooplankton were not. This study provides basic materials for the structure of marine food webs in the western South China Sea.

Key words: zooplankton; biomass; stable isotope; western South China Sea

浮游生态系统的结构和功能不仅受到理化因素的影响,还受到各物种相互作用的影响。在海洋浮游食物网中,捕食者体型通常要大于被捕食者,且营养等级与浮游生物个体大小相关,故常通过分析不同粒级浮游生物特征来研究海洋浮游食物网结构^[1-4]。在海洋浮游食物网中,浮游动物通常将摄食浮游植物所固定的能量和物质向高营养层次传递,对其营养结构和功能进行研究,有助于更好地了解浮游动物在整个海洋生态系统中发挥的作用^[5-7]。

稳定同位素技术(stable isotope analysis)已成为研究海洋食物网结构的重要方法之一^[8-10],其中 $\delta^{13}\text{C}$ 在各营养级间平均富集量变化小,可用来分析食物来源及贡献量, $\delta^{15}\text{N}$ 在营养级间增加的富集量相对稳定(平均约 3.4‰),常被用来研究生物之间的营养级关系^[11-13]。国内外已有较多学者运用稳定同位素方法分析研究了浮游食物网粒级结构,Fry 等^[14]研究发现,不同大小浮游动物营养级间有一定程度的重叠,且浮游动物生物量随着营养级的增加而下降;Giering 等^[15]应用稳定同位素对凯尔特海浮游动物营养结构的研究表明,浮游动物生物量与群落营养级间有显著相关性;Figueiredo 等^[16]研究指出,浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 和营养级随着体型增大而增加,且浮游动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 显著高于颗粒有机物(particulate organic matter, POM);蔡德陵等^[17]研究发现,渤海中型浮游生物的 $\delta^{13}\text{C}$ 也随浮游动物粒径的增大而增加;刘华雪等^[18-19]和张文博等^[6]研究发现,各粒径浮游动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 存在明显的季节及空间分布差异。

南海西部海域大陆架较狭窄,受东亚季风驱动,物理过程复杂多样,夏季越南东部沿岸的强上升流和南海西部海域的中尺度涡旋共同影响该海域的生态环境^[20]。目前关于南海西部海域浮游动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 研究较少,主要集中在越南沿岸区域^[21-22],南海西部开阔海域浮游动物稳定同位素分布特征及其对物理过程的响应特征

有待进一步了解。本文基于 2018 年夏季采集的浮游动物样品,分析了南海西部海域不同粒级浮游动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 分布特征,并探讨了越南上升流及中尺度涡旋对浮游动物稳定同位素的影响,研究结果可为南海西部浮游食物网结构的研究提供基础材料。

1 材料与方法

1.1 样品采集与处理

1.1.1 调查站位

2018 年夏季,搭载中国水产科学研究院南海水产研究所“南锋号”科考船对南海西部海域进行了调查,采样站位见表 1,所有调查站位水深均超过 200 m。

表 1 南海西部海域调查站位信息			
Tab.1 Survey stations in the western South China Sea			
采样点位	采样日期	经度	纬度
B1	2018-08-26	14.5035°E	110.0222°N
B3	2018-08-26	14.4994°E	112.0038°N
B9	2018-08-28	13.5602°E	111.0147°N
B11	2018-08-27	13.5349°E	112.0081°N
B12	2018-08-27	13.5025°E	112.5050°N
B17	2018-08-29	12.6072°E	111.0141°N
B19	2018-08-29	12.5259°E	112.0060°N
B23	2018-08-30	12.0335°E	111.9990°N
B25	2018-09-13	11.5037°E	111.1899°N
B27	2018-08-30	11.5200°E	112.1602°N
B28	2018-08-30	11.5037°E	112.5660°N
B33	2018-09-12	10.5583°E	110.0094°N
B35	2018-08-31	10.4949°E	112.0164°N
B39	2018-08-31	10.0911°E	112.0520°N

1.1.2 环境样品

每个调查站位的海水表层温度、表层盐度由 CTD 现场测定。使用卡盖式采水器采集 1 L 表层海水,使用 GF/F 膜过滤,用锡纸包裹滤膜后置于液氮中保存,送回实验室后利用萃取荧光法进行叶绿素 *a* 浓度测定。

1.1.3 浮游动物样品

参考已有研究成果^[6,19,23],本研究将浮游动物按照粒径划分为小型(180~380 μm)、中型(380~500 μm)和大型(>500 μm)。选用孔径160 μm的Ⅱ型浮游生物网采集每个调查站位0~200 m水柱的浮游动物样品,采集后的浮游动物样品经阴凉处排空、筛网分级过滤分离(依次通过500 μm、380 μm和180 μm筛网过滤)、蒸馏水反洗。将收集样品的GF/F滤膜使用已预先在马弗炉中450℃灼烧4h的锡纸包裹后置于液氮中保存。实验室分析时,先将收集样品的GF/F滤膜于60℃下烘干至恒重,烘干后的样品经研磨、过筛后上机检测。

1.2 数据分析

δ 的计算公式如下:

$$\delta = \frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}}{R_{\text{standard}}} \times 1000 \quad (1)$$

式中: δ 代表 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$; R_{sample} 表示所测样品的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 、 $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$; R_{standard} 是国际上通用标准物质的重、轻同位素丰度之比。稳定同位素样品的测定在中国科学院水生生物研究所进行。采用CE公司的CarloErba NC 2500元素分析仪与Thermo fisher公司的Delta Plus质谱仪联用测定浮游动物碳、氮稳定同位素,参考物质分别为美洲拟箭石(Pee Dee Belemnite, PDB)和大气氮,标准物质分别为国际上通用的IAEA-USGS24和IAEA-USGS26,为保证测试结果准确性,每测试10个样品后加测一个标准样。

采用WPS软件进行数据处理及表格制作;采用ArcGIS 10.5软件绘制调查站位图及浮游动物生物量分布图;采用SigmaPlot 14.0软件绘制柱状图;采用SPSS 22.0软件进行不同粒级浮游动物生物量、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的ANOVA显著性分析(两两比较采用LSD方法)以及Pearson相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 海表温度、盐度及叶绿素a浓度

南海西部海域海水表层温度范围为27.33℃~29.30℃,平均值为(28.10±0.63)℃,海水表层盐度范围为32.25~34.16,平均值为(33.49±0.52),

海水表层温度与表层盐度整体呈现相反的空间分布趋势,在11°N—12°N海域有明显的温盐度锋面分布,锋面以北海域呈现低温、高盐的冷水团特征,以南海域呈现高温、低盐的暖水团特征,表现出冷-暖涡偶极结构(图1)。受季风及地形的影响,南海西部海域夏季常会形成沿岸上

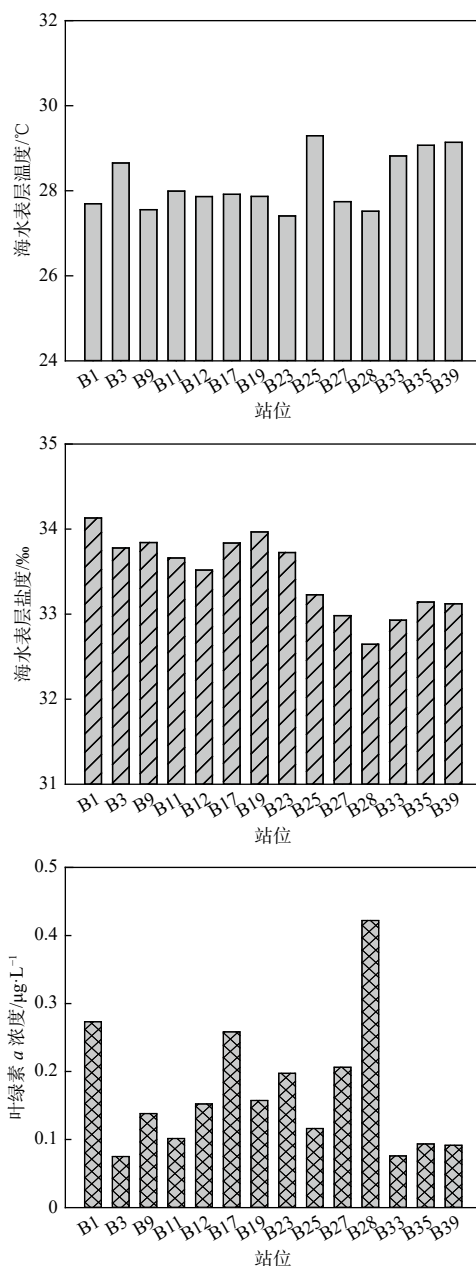


图1 南海西部海域表层温度、表层盐度及叶绿素a浓度分布

Fig. 1 The distributions of sea surface temperature, sea surface salinity and chlorophyll a in the western South China Sea

升流、冷涡、锋面等中尺度物理过程,影响海水营养盐浓度,进而影响浮游植物的生长与分布^[24-25]。受中尺度涡影响,南海西部锋面以北海域营养盐相对充足,叶绿素 *a* 浓度也相对较高,锋面以南海域营养盐浓度相对较低,叶绿素 *a* 浓度较低。研究海域中部温盐度锋面区域叶绿素 *a* 浓度较高, B28 站位出现了最高值,这可能与涡旋抽吸作用促进了浮游植物的生长有关^[26-27]。本研究中海域中部温盐度锋面区域叶绿素 *a* 浓度平均值为 $(0.14 \pm 0.09) \mu\text{g/L}$, 接近梁文钊等^[20] 和冷晓云等^[28] 研究中海域中部的叶绿素 *a* 平均浓度。

2.2 浮游动物生物量

南海西部海域浮游动物生物量整体水平较高,具有明显的空间分布差异(图 2),高值区集中在中部温盐度锋面海域(B27 和 B28 站位)和西部海域(B17 和 B9 站位),其中最高值出现在 B27 站位,为 14.77 mg/m^3 ,其次是 B28 站位(10.78 mg/m^3)、B17 站位(10.38 mg/m^3)和 B9 站位(9.48 mg/m^3),海域最南部站位(B33、B35 和 B39 站位)及最北部站位(B1 和 B3 站位)的浮游动物生物量相对较低。浮游动物通过摄食浮游植物将能量和物质向更高营养层次传递,其生物量明显受浮游植物生长和分布的影响^[29-30]。研究海域中部及西部受离岸急流及冷涡中心区域深层冷水团上涌影响,营养盐浓度相对较高,有利于浮游植物的生长,而最北部海域位于冷涡边缘,深层水垂直抽吸作用弱,营养盐浓度相对较低,最南部海域受暖涡上层暖水团下沉影响,营

养盐缺乏,加之浮游植物的吸收利用,进一步降低了营养盐浓度,限制了浮游植物生长,进而影响了浮游动物的生物量。

浮游动物生物量存在粒径差异($p < 0.01$),大型浮游动物生物量平均值为 $(4.41 \pm 2.06) \text{ mg/m}^3$, 高于中型浮游动物生物量 $[(0.63 \pm 0.21) \text{ mg/m}^3]$ 和小型浮游动物生物量 $[(2.26 \pm 1.15) \text{ mg/m}^3]$,各粒径浮游动物生物量平均占比分别为 59.32%、31.37% 和 9.31%。不同粒径浮游动物生物量分布存在空间差异,大型浮游动物生物量高值主要出现在研究海域中部和西部,而小型浮游动物生物量高值多出现在最南部区域,中型浮游动物生物量高值则主要出现在最南部和最北部,这可能与不同海域浮游植物粒径结构不同有关^[31-32]。已有研究指出,当环境营养较充足时,粒径较大的浮游植物生长速率较快,寡营养环境中粒径较小的浮游植物比例相对更高^[20]。在受冷涡及离岸急流影响的中部及西部海域营养物质相对充足,粒径较大的浮游植物占比较高,更易被体型较大的浮游动物摄食,故中部及西部海域大型浮游动物生物量较高,南部海域小型浮游动物生物量相对较高。

2.3 各粒径浮游动物碳、氮稳定同位素

南海西部海域浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 均存在显著粒径差异($p < 0.01$),其中大型浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ $[(7.14 \pm 0.93)\text{‰}]$ 高于中型浮游动物 $[(6.11 \pm 0.99)\text{‰}]$ 和小型浮游动物 $[(6.02 \pm 0.91)\text{‰}]$,中型浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ $[-22.34 \pm 1.92)\text{‰}]$ 低于大型浮游动物 $[-18.53 \pm 1.98)\text{‰}]$ 和小型浮游动物 $[-19.72 \pm 1.96)\text{‰}]$ 。海洋浮游生物存在以个体大小为基础的消费关系,故粒径较大的浮游动物通常营养级更高^[23]。本研究中浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 也反映了这一变化特征,浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 随着粒径增大而增加。各粒径浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 空间分布特征相似(图 3),研究海域西部站位(B9 和 B17 站位)及中部锋面站位(B27 和 B28 站位)各粒径浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 均较高(各粒径浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 最高值分别为 8.40‰ 、 7.20‰ 和 7.22‰ , $\delta^{13}\text{C}$ 最高值分别为 -14.84‰ 、 -18.91‰ 和 -15.67‰),南部站位相对较低。研究海域中部及西部海域营养盐相对充足,粒径较大的浮游动物占比更高,其

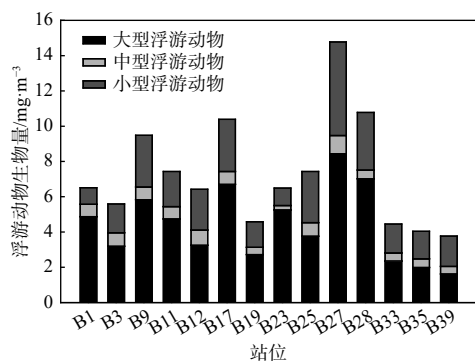


图 2 南海西部海域调查点位各粒径浮游动物生物量分布

Fig. 2 The distribution of size-fractionated zooplankton biomass in survey stations in the western South China Sea

$\delta^{15}\text{N}$ 也相对较高。Loick 等^[21] 研究越南上升流海区浮游生物特征时也指出, 体型更大的浮游生物会具有更大的 $\delta^{15}\text{N}$ 和更高的营养位置, 本研究结果与之相符。研究海域的中部及西部营养物质来源丰富, 不仅有冷涡上涌带来的深层营养物质, 还有沿岸上升流及离岸急流水平输送带来的陆源营养物质, 使得该区域浮游动物具有较高的 $\delta^{13}\text{C}$ ^[33-34]。

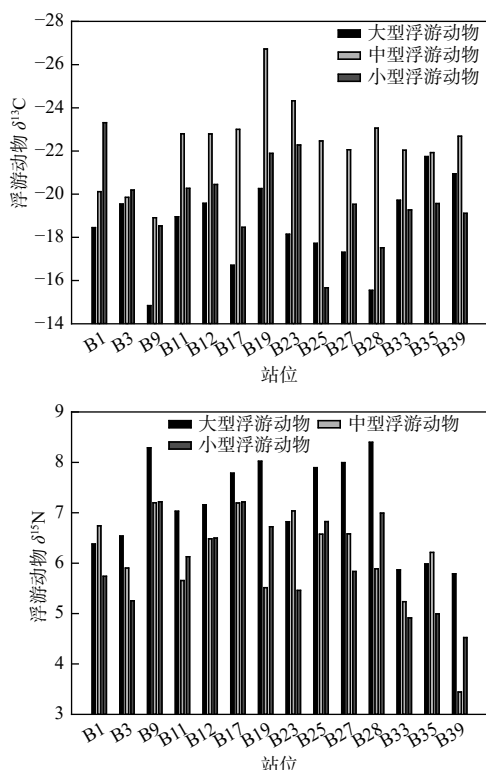


图 3 南海西部海域各粒级浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 分布

Fig. 3 The distribution of $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ of size-fractionated zooplankton in the western South China Sea

对浮游动物生物量及 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 进行相关性分析可知, 浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 与生物量显著相关, 其中大型浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 与小型浮游动物生物量、大型浮游动物生物量和浮游动物总生物量都存在显著的正相关关系 ($p < 0.01$); 中型及小型浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 与大型浮游动物生物量均呈现正相关关系 ($p < 0.05$); 小型浮游动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 与小型浮游动物生物量 ($p < 0.05$) 也呈现正相关关系 (表 2)。相似的研究结果也出现在南海北部和南部海域, 表明浮游动物稳定同位素的空间分布明显受其生物量影响^[6,13,18-19]。南海

是中国最大的边缘海, 物理过程复杂, 尤其是南海西部海域及北部海域, 受季风、冷涡、上升流及冲淡水等物理过程影响, 海水营养盐水平相对较高。在相对充足的营养物质供给下, 浮游生物大量繁殖, 能够支撑更高营养级的肉食性浮游动物的生长。Chen 等^[35] 研究浮游动物摄食生态与繁殖时就指出, 充足的食物供给是珠江冲淡水和黑潮水入侵区域浮游动物群落内肉食者与植/杂食者生物量比值较高的主要原因。本研究中海南海西部海域受冷涡及上升流的共同影响, 营养物质浓度较高, 来源丰富, 促进了浮游植物的生长, 尤其是粒级较大的浮游植物。而浮游动物对浮游植物的摄食压力随粒级增大而减小^[36], 故粒级较小的浮游动物会优先响应浮游植物丰度和群落结构的变化。因此, 小型浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 与浮游动物生物量具有明显的正相关关系。随着能量向更高营养级的传递, 粒级较大的肉食性浮游动物生物量比例会相应增加, 而体型较大的肉食性浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 也较高。研究海域陆源营养物质的输入会随着食物链传递影响浮游植物和浮游动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 。故大型浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 与浮游动物生物量呈现明显的正相关关系。

表 2 各粒级浮游动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 与生物量的相关分析

Tab.2 Correlation analysis between $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of size-fractionated zooplankton and biomass

粒径范围/ μm	$\delta^{13}\text{C}/\delta^{15}\text{N}$	生物量			
		小型浮游动物	中型浮游动物	大型浮游动物	全部
180 ~ 380	$\delta^{13}\text{C}$	0.561*	0.237	0.124	0.306
	$\delta^{15}\text{N}$	0.424	0.325	0.545*	0.541*
380 ~ 500	$\delta^{13}\text{C}$	0.114	0.471	0.119	0.153
	$\delta^{15}\text{N}$	0.246	0.370	0.595*	0.511
>500	$\delta^{13}\text{C}$	0.565*	0.305	0.831**	0.781**
	$\delta^{15}\text{N}$	0.646*	0.342	0.686**	0.718**

注: *: $p < 0.05$; **: $p < 0.01$

2.4 南海西部与其他海域浮游动物稳定同位素比较

为了更好地了解南海西部海域浮游动物稳定同位素特征, 将其与其他海域同类研究结果进行了比较。通过比较南海不同海域可知, 南海西部、南部和北部海域夏季浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 均随

粒径的增大而增大,而 $\delta^{13}\text{C}$ 的变化趋势空间差异显著,其中南海西部、南部海域中型浮游动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 均显著低于小型浮游动物和大型浮游动物,南海北部浮游动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 无显著的粒径差异(表 3)。与其他海域相比,南海西部海域浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 处于相对较高水平,与波罗的海^[23]和黄海^[37]相差不大,高于南海北部^[6]和南部^[19]、大西洋^[16],这可能与南海西部海域易受沿岸上升流、涡旋等中尺度物理过程影响有关(表 4);南海西部海域浮游动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 处于相对较高水平,与渤海湾^[38]浮游动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 接近,这可能与南海西部海域、渤海湾有较多陆源输入有关^[39]。

表 3 夏季南海西部、南部与北部浮游动物碳、氮稳定同位素比较

Tab.3 Comparison on stable carbon and nitrogen isotope of zooplankton between western, southern and northern South China Sea (mean±sd)

粒径/ μm	南海西部		南海南部 ^[18-19]		南海北部 ^[6,13]	
	$\delta^{13}\text{C}/(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}/(\text{‰})$	$\delta^{13}\text{C}/(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}/(\text{‰})$	$\delta^{13}\text{C}/(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}/(\text{‰})$
180 ~ 380	-19.72±1.96	6.02±0.91	-21.47±0.40	2.53±6.51	-22.07±0.95	5.34±1.10
380 ~ 500	-22.34±1.92	6.11±0.99	-22.62±6.71	3.12±6.79	-22.00±0.94	5.75±1.16
>500	-18.53±1.98	7.14±0.93	-21.76±1.04	4.87±10.25	-22.04±1.13	6.58±0.99

表 4 不同海域各粒级浮游动物碳、氮稳定同位素

Tab.4 Different study areas of stable carbon and nitrogen isotope of size-fractionated zooplankton

粒径范围/ μm	时间	$\delta^{13}\text{C}/(\text{‰})$	$\delta^{15}\text{N}/(\text{‰})$	调查海域
100 ~ 200	1994—1995年	-26.50 ~ -19.40	2.6 ~ 7.7	波罗的海 ^[23]
200 ~ 500		-26.10 ~ -21.70	3.0 ~ 10.5	
500 ~ 1500		-24.90 ~ -22.10	6.4 ~ 9.2	
>160	2002—2003年	-19.42±1.07	6.14±0.51	渤海湾 ^[39]
100 ~ 200	2009—2010年	-21.07±1.19(秋)	4.71±1.77(秋)	黄东海 ^[37]
		-20.43±3.09(春)	4.24±1.86(春)	
200 ~ 500		-19.95±1.34(秋)	5.25±1.88(秋)	
		-20.39±2.83(春)	5.39±1.51(春)	
500 ~ 1000		-19.60±1.09(秋)	7.05±1.08(秋)	
		-20.08±2.16(春)	6.23±1.04(春)	
1000 ~ 2000		-19.08±1.33(秋)	7.48±1.23(秋)	
		-19.56±2.49(春)	6.32±0.98(春)	
<200	2015年9月—10月	-21.74±0.05	4.92±0.50	大西洋大陆坡 ^[16]
200 ~ 500		-21.46±0.63	3.06±0.94	
500 ~ 1000		-21.14±0.48	4.03±0.92	
1000 ~ 2000		-21.58±0.86	4.13±0.79	
>2000		-21.75±0.66	5.04±1.09	

3 结论

(1)南海西部浮游动物生物量整体水平较高, $\delta^{13}\text{C}$ 变化范围为-26.73‰~-14.84‰, $\delta^{15}\text{N}$ 变化范围为 3.44‰~8.40‰。浮游动物生物量、 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{15}\text{N}$ 的空间分布差异明显,高值区分布在受沿岸上升流及冷涡影响的西部和中部海域。

(2)各粒级浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 随粒径增大而增加,中型浮游动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 显著低于小型浮游动物和大型浮游动物。相关性分析显示,大型浮游动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 及小型浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 与生物量存在显著的正相关关系,而中型浮游动物的 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 与生物量的相关性不明显。

参考文献:

- [1] FARIAS G B, MOLINERO J C, CARRÉ C, et al. Uncoupled changes in phytoplankton biomass and size structure in the western tropical Atlantic[J]. *Journal of Marine Systems*, 2022, 227: 103696.
- [2] BLANCHARD J L, HENEGHAN R F, EVERETT J D, et al. From bacteria to whales: using functional size spectra to model marine ecosystems[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2017, 32(3): 174-186.
- [3] YANG G, LI C L, GUILINI K, et al. Regional patterns of $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ stable isotopes of size-fractionated zooplankton in the western tropical North Pacific Ocean[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2017, 120: 39-47.
- [4] BĂNARU D, CARLOTTI F, BARANI A, et al. Seasonal variation of stable isotope ratios of size-fractionated zooplankton in the bay of Marseille (NW Mediterranean Sea)[J]. *Journal of Plankton Research*, 2014, 36(1): 145-156.
- [5] BRITO-LOLAIA M, DE FIGUEIREDO G G A A, NEUMANN-LEITÃO S, et al. Can the stable isotope variability in a zooplankton time series be explained by its key species?[J]. *Marine Environmental Research*, 2022, 181: 105737.
- [6] 张文博, 刘华雪, 巩秀玉, 等. 南海北部不同粒级浮游动物氮稳定同位素研究[J]. *南方水产科学*, 2017, 13(6): 48-55.
- [7] YANG G, LI C L, GUILINI K, et al. Feeding strategies of four dominant copepod species in Prydz Bay, Antarctica: insights from a combined fatty acid biomarker and stable isotopic approach[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2016, 114: 55-63.
- [8] KE Z X, LI R F, CHEN D T, et al. Spatial distributions of zooplankton stable isotopes and their trophic positions in a bay under serious anthropogenic influences: Daya Bay, China[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 139: 108950.
- [9] 汪慧娟, 张文博, 黄洪辉, 等. 基于碳、氮稳定同位素的大亚湾渔业生物群落营养结构[J]. *南方水产科学*, 2021, 17(5): 101-109.
- [10] HUNT B P V, ALLAIN V, MENKES C, et al. A coupled stable isotope-size spectrum approach to understanding pelagic food-web dynamics: a case study from the southwest sub-tropical Pacific[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2015, 113: 208-224.
- [11] EGLITE E, WODARG D, DUTZ J, et al. Strategies of amino acid supply in mesozooplankton during cyanobacteria blooms: a stable nitrogen isotope approach[J]. *Ecosphere*, 2018, 9(3): e02135.
- [12] 张文博, 黄洪辉, 李纯厚, 等. 华南典型海湾主要渔业生物碳氮稳定同位素研究[J]. *南方水产科学*, 2019, 15(5): 9-14.
- [13] 刘华雪, 张文博, 徐军, 等. 南海北部不同粒级浮游动物碳稳定同位素研究[J]. *南方水产科学*, 2018, 14(2): 36-40.
- [14] FRY B, QUINONES R B. Biomass spectra and stable isotope indicators of trophic level in zooplankton of the northwest Atlantic[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, 112(1/2): 201-204.
- [15] GIERING S L C, WELLS S R, MAYERS K M J, et al. Seasonal variation of zooplankton community structure and trophic position in the Celtic Sea: a stable isotope and biovolume spectrum approach[J]. *Progress in Oceanography*, 2019, 117: 101943.
- [16] DE FIGUEIREDO G G A A, SCHWAMBORN R, BERTRAND A, et al. Body size and stable isotope composition of zooplankton in the western tropical Atlantic[J]. *Journal of Marine Systems*, 2020, 212: 103449.
- [17] 蔡德陵, 王荣, 毕洪生. 渤海生态系统的营养关系: 碳同位素研究的初步结果[J]. *生态学报*, 2001, 21(8): 1354-1359.
- [18] 刘华雪, 徐军, 李纯厚, 等. 南海南部浮游动物稳定同位素研究——碳稳定同位素[J]. *热带海洋学报*, 2015, 34(4): 59-64.
- [19] 刘华雪, 徐军, 李纯厚, 等. 南海南部浮游动物稳定同位素研究——氮稳定同位素[J]. *热带海洋学报*, 2015, 34(2): 32-38.
- [20] 梁文钊, 唐丹玲. 南海西部夏季表层浮游植物粒径结构分布特征分析[J]. *热带海洋学报*, 2017, 36(4): 93-101.
- [21] LOICK N, DIPPNER J, DOAN H N, et al. Pelagic nitrogen dynamics in the Vietnamese upwelling area according to stable nitrogen and carbon isotope data[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2007, 54(4): 596-607.
- [22] WEBER S C, LOICK-WILDE N, MONTOYA J P, et al. Environmental regulation of the nitrogen supply, mean trophic position, and trophic enrichment of mesozooplankton in the Mekong River plume and southern South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2021, 126(8): e2020JC017110.
- [23] ROLFF C. Seasonal variation in $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ of size-fractionated plankton at a coastal station in the northern Baltic proper[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2000, 203: 47-65.
- [24] 杨雪晴, 韩贵艳, 田丰林, 等. 南海中尺度涡的形转、内转及平移运动研究[J]. *海洋通报*, 2020, 39(5): 536-547.
- [25] 郑全安, 谢玲玲, 郑志文, 等. 南海中尺度涡研究进展[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(2): 131-158.
- [26] LIU F F, TANG S L. A double-peak intraseasonal pattern in the chlorophyll concentration associated with summer upwelling and mesoscale eddies in the western South China Sea[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2022, 127(1): e2021JC017402.
- [27] XIE S P, XIE Q, WANG D X, et al. Summer upwelling in the South China Sea and its role in regional climate variations[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2003, 108(C8): 3261.
- [28] 冷晓云, 杨阳, 孙军, 等. 夏季南海西部中尺度物理过程对营养盐和叶绿素a分布特征的影响[J]. *海洋学报*, 2016, 38(4): 66-75.
- [29] 李开枝, 任玉正, 柯志新, 等. 南海东北部陆坡区中上层浮游动物的垂直分布[J]. *热带海洋学报*, 2021, 40(2): 61-73.
- [30] 龚玉艳, 杨玉滔, 范江涛, 等. 南海北部陆架斜坡海域夏季浮游动物群落的空间分布[J]. *南方水产科学*, 2017, 13(5): 8-15.

- [31] 钟超, 肖武鹏, 黄邦钦. 中国南海西部浮游植物对中尺度涡的响应[J]. *海洋科学进展*, 2013, 31(2): 213-220.
- [32] AGAWIN N S R, DUARTE C M, AGUSTÍ S. Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production[J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(3): 591-600.
- [33] LIU H J, ZHU M L, GUO S J, et al. Effects of an anticyclonic eddy on the distribution and community structure of zooplankton in the South China Sea northern slope[J]. *Journal of Marine Systems*, 2020, 205: 103311.
- [34] JU P L, CHEN M R, CHEUNG W W L, et al. Modelling the structure and functioning of an upwelling ecosystem in the Southern Taiwan Strait, China[J]. *Journal of Marine Systems*, 2022, 226: 103666.
- [35] CHEN Y X, LIN S Q, WANG C S, et al. Response of size and trophic structure of zooplankton community to marine environmental conditions in the northern South China Sea in winter[J]. *Journal of Plankton Research*, 2020, 42(3): 378-393.
- [36] YUE J Q, NOMAN A M, SUN J. Kuroshio intrusion drives the *Trichodesmium* assemblage and shapes the phytoplankton community during spring in the East China Sea[J]. *Journal of Oceanology and Limnology*, 2021, 39(2): 536-549.
- [37] 金鑫. 黄东海浮游食物网的初步研究——基于脂肪酸标记法和碳氮稳定同位素比值法[D]. 青岛: 中国科学院研究生院(海洋研究所), 2011: 21-26.
- [38] 万祎, 胡建英, 安立会, 等. 利用稳定氮和碳同位素分析渤海湾食物网主要生物的营养层次[J]. *科学通报*, 2005, 50(7): 708-712.
- [39] 张海波, 裴绍峰, 祝雅轩, 等. 初夏渤海湾初级生产力分布特征及影响因素[J]. *生态学报*, 2019, 39(17): 6416-6424.
- (本文编辑: 胡莹莹)

(上接第 88 页)

- [10] LI W B, FANG J P, XING Z, et al. Ecological vulnerability evaluation of Nyingchi city based on landscape pattern[J]. *Bangladesh Journal of Botany*, 2020, 49(3): 743-755.
- [11] CHI Y, SHI H H, WANG Y Y, et al. Evaluation on island ecological vulnerability and its spatial heterogeneity[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2017, 125(1/2): 216-241.
- [12] MA X, De JONG M, SUN B Q, et al. Nouveauté or Cliché? Assessment on island ecological vulnerability to Tourism: application to Zhoushan, China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 113: 106247.
- [13] 张慈珩, 信书, 赵鹏, 等. 珠海三角岛沙滩修复工程岸滩演变数值模拟研究[J]. *中国港湾建设*, 2020, 40(7): 1-5.
- [14] 田盛. 舟山岛及其附近岛屿生态脆弱性时空变化研究[D]. 杭州: 浙江海洋大学, 2021: 16-26.
- [15] 曹志勇, 郝海森, 张丽军, 等. 平原水库微污染水溶解氧含量模型反演与验证[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(10): 6023-6024.
- [16] 赵倩. 广州市黑臭水体评价模型构建及污染溯源研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2021: 19-28.
- [17] 叶素素, 张群珧, 逯玲燕, 等. 无居民海岛生态监视监测指标体系构建研究——以广东省三角岛为例[J]. *海洋信息*, 2021, 36(3): 49-55.
- [18] 朱卫红, 苗承玉, 郑小军, 等. 基于3S技术的图们江流域湿地生态安全评价与预警研究[J]. *生态学报*, 2014, 34(6): 1379-1390.
- [19] 黄华富, 戴文远, 苏木兰, 等. 海岛生态脆弱区土地利用程度空间格局演化——以福建省海坛岛为例[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 32(2): 92-100.
- [20] CHEN X W, LI X M, ELADAWY A, et al. A multi-dimensional vulnerability assessment of Pingtan Island (China) and Nile Delta (Egypt) using ecological Sensitivity-Resilience-Pressure (SRP) model[J]. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 2021, 27(7): 1860-1882.
- [21] DOSSOU J F, LI X X, SADEK M, et al. Hybrid model for ecological vulnerability assessment in Benin[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 2449.
- [22] SONG C W, DU H S. Spatial and temporal variations in the ecological vulnerability of Northern China[J]. *Journal of Sensors*, 2022: 7232830.
- [23] 雷嫦. 基于SRP模型的贵阳市生态环境脆弱性动态评价[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2021: 21-22.
- [24] 陈璐, 陈莉, 石梦双. 天津市郊区土壤细粒径空间分布及变异性分析[J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(7): 29-34, 63.
- [25] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [26] LI X C, NIU Y, HE Q N, et al. Identifying driving factors of the runoff coefficient based on the geographic detector model in the upper reaches of Huaihe River Basin[J]. *Open Geosciences*, 2022, 14(1): 1421-1433.
- [27] 罗茵, 方琼玟. 三角岛推进依法依规用岛实现可持续发展——访广东省自然资源厅海岛管理工作组组长周小壮[J]. *海洋与渔业*, 2019 (1): 42-45.
- [28] 徐翔宇, 李云玲, 郦建强, 等. 海岛水资源开发利用和保护研究[J]. *中国水利*, 2020 (23): 44-46.
- [29] 王茜, 赵筱青, 普军伟, 等. 喀斯特山区土地利用变化对生态脆弱性的影响[J]. *山地学报*, 2022, 40(2): 289-302.
- (本文编辑: 曲丽梅)