

doi: 10.3969/j.issn.2095-0780.2017.06.006

南海北部不同粒径浮游动物氮稳定同位素研究

张文博^{1,2}, 刘华雪¹, 巩秀玉¹, 史荣君¹, 黄洪辉¹

(1. 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东省渔业生态环境重点实验室, 农业部北海渔业开发重点实验室, 广东 广州 510300; 2. 上海海洋大学水产与生命学院, 上海 201306)

摘要: 在2015年夏季和冬季开展了南海北部海域不同粒径浮游动物生物量和氮稳定同位素特征的研究。按照浮游动物粒径大小将其分成3个类群, 即小型浮游动物(180~380 μm)、中型浮游动物(380~500 μm)和大型浮游动物(>500 μm)。结果显示浮游动物生物量和氮稳定同位素空间分布差异明显, 高值区多分布于珠江口、东沙群岛和台湾海峡南部海域。浮游动物氮稳定同位素 $\delta^{15}\text{N}$ 值出现显著的季节和粒径结构差异, 其中夏季 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值高于冬季, 以小型浮游动物尤为明显($P<0.01$)。各粒径浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值随粒径增大而增加。小型和中型浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值与浮游动物生物量有显著的相关性, 而大型浮游动物与浮游动物生物量则关系不明显。

关键词: 浮游动物; 生物量; 氮稳定同位素; 南海北部

中图分类号: Q 958.885.3

文献标志码: A

文章编号: 2095-0780-2017(06)-0048-08

Stable nitrogen isotope of size fractionated zooplankton in northern South China Sea

ZHANG Wenbo^{1,2}, LIU Huaxue¹, GONG Xiuyu¹, SHI Rongjun¹, HUANG Honghui¹

(1. Guangdong Provincial Key Lab. of Fishery Ecology and Environment; Key Lab. of Offshore Fishery Development, Ministry of Agriculture; South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China;

2. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: The stable nitrogen isotope and biomass of zooplankton based on size fractionation were studied in the northern South China Sea during summer and winter, 2015. The zooplankton was divided into three groups according to size structure, i. e., micro-zooplankton (180~380 μm), meso-zooplankton (380~500 μm) and macro-zooplankton (>500 μm). The results show that significant spatial difference exist between zooplankton biomass and stable nitrogen isotope. And high values appeared around the Pearl River estuary, Dongsha Islands and south Taiwan Strait. The mean $\delta^{15}\text{N}$ value of zooplankton in summer was higher than that in winter, especially that of the micro-zooplankton ($P<0.01$), and the $\delta^{15}\text{N}$ value of size-fractionated zooplankton generally increased from small to large size zooplankton. The correlation analysis shows that both the $\delta^{15}\text{N}$ value of micro- and meso-zooplankton are closely related to zooplankton biomass, while the $\delta^{15}\text{N}$ value of macro-zooplankton is not.

Key words: zooplankton; biomass; stable nitrogen isotope; northern South China Sea

浮游动物既是初级消费者又是次级消费者, 通过对浮游植物和微型浮游动物的摄食, 将其固定的能量和物质向高营养层次传递, 是联系微食物网和

经典食物链的中间环节^[1]。生物体氮稳定同位素技术广泛应用于生态系统的研究中。在食物链传递中, 氮稳定同位素(^{15}N)通常随着营养等级升高而

收稿日期: 2017-03-30; 修回日期: 2017-04-26

资助项目: 农业部财政重大专项(NFZX2013); 国家重点研发计划项目(2016YFC1401604)

作者简介: 张文博(1991-), 男, 硕士研究生, 从事海洋生态学研究。E-mail: wenbozhang91@163.com

通信作者: 黄洪辉(1972-), 男, 博士, 研究员, 从事海洋生态和海洋环境科学研究。E-mail: huanghh@scsfri.ac.cn

富集，一般被用于研究生物之间的营养级关系，是一种方便、有效的研究浮游食物网结构的方法^[2]。国外学者采用分粒径法对浮游动物稳定同位素展开了研究^[3-5]，而中国使用稳定同位素技术开展浮游食物网粒级结构的研究较少见。

蔡德陵等^[6]研究渤海分粒级浮游动物的碳稳定同位素时发现中型浮游生物的碳稳定同位素随粒径的增大而增加；金鑫^[7]对黄东海不同粒级浮游动物的稳定同位素研究发现浮游动物的稳定同位素存在季节差异，稳定同位素随粒径增大而增加且呈线性相关；柯志新等^[8]以浮游生物的生物量与氮稳定同位素所构建的大亚湾营养级谱可比较不同区域生态系统结构的稳定性；刘华雪等^[9-10]发现南海南部不同粒级浮游动物碳和氮稳定同位素值存在季节差异。

南海是中国最大的边缘海，海底地形自西北向东南方向下倾，西面为宽广的大陆架，并有珠江径流的输入，东面的吕宋海峡则是南海与大洋及邻近边缘海连接通道中的唯一深水通道，物理过程复杂。关于南海北部浮游动物的研究已取得一定进展，但研究区域多集中在珠江河口、海湾以及近岸海域^[11-13]，研究内容多为浮游动物的某一类群^[1,14]。虽然也有对南海北部大尺度海区浮游动物群落的调查^[15]，但主要还是对浮游动物优势种和多样性的研究，而对于南海北部分粒级浮游动物氮稳定同位素的研究尚未见报道。笔者根据2015年夏季和冬季采集的南海北部浮游动物样本，探讨了不同粒级浮游动物生物量和氮稳定同位素的时空分布特征，以为南海的生态系统结构研究提供基础材料。

1 材料与方法

在2015年夏季(7月27日-8月16日)和冬季(12月3日-12月23日)对南海北部海域(112°E~120°E, 18.5°N~21.5°N)进行大面调查，采样站位见图1。由于冬季采样期间受到天气的影响，冬季采样站位与夏季有所不同。夏季有10个采样站位，冬季有8个站位，共同站位5个。其中C1站水深小于200 m，其余站位水深均超过200 m。2个航次均使用中国水产科学研究院南海水产研究所“南锋”号调查船。

1.1 样品采集与处理

浮游动物粒级的划分参考ROLFF^[16]、柯志新

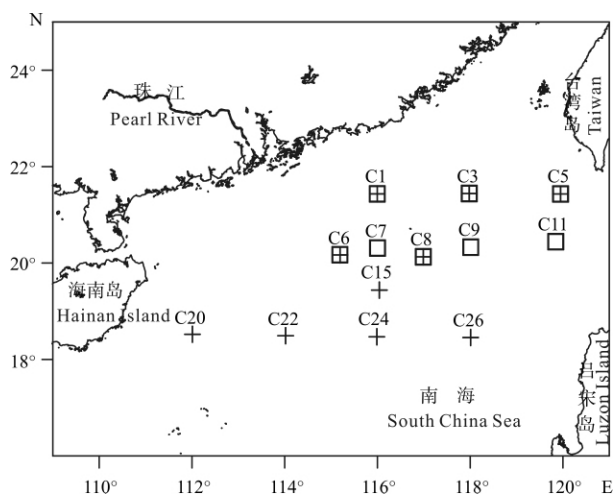


图1 南海北部采样站位图

正方形代表冬季站位，十字形代表夏季站位

Fig. 1 Sampling stations in northern South China Sea

The crosses represent sampling stations in summer, and the squares represent sampling stations in winter.

等^[8]和刘华雪等^[9]的方法，将浮游生物粒级梯度分为180~380 μm(小型)、380~500 μm(中型)和>500 μm(大型)。使用Ⅱ型浮游生物网(孔径160 μm)自水深200 m处垂直拖至表层(水深小于200 m时，从底层垂直拖至表层)，将采集到的浮游动物样品置于盛有已过滤海水的水桶中，阴凉处排空2 h，然后将排空后的样品依次用500 μm、380 μm和180 μm的筛网过滤分离，用蒸馏水反洗之后用GF/F滤膜收集(用于样品富集的GF/F膜预先在马弗炉中450℃灼烧4 h以去除可能的有机质影响)，滤膜用锡纸包裹后置于-20℃冰箱保存。

实验室中将载有浮游动物样品的滤膜于60℃下烘干至恒质量。将烘干后的样品研磨成均匀粉末，过筛后放入干燥器中保存。分析仪器为Finnigan delta plus和Flash EA1112联用仪，为了保证测试结果的准确性，每测试10个样品后加测1个标准样，并且对个别样品进行2~3次的复测。

1.2 数据分析

氮稳定同位素 $\delta^{15}\text{N}$ 值计算如下^[17]：

$$\delta = (R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}} \times 1000$$

式中 δ 为氮同位素值； R_{sample} 为所测样品的同位素比值($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$)； R_{standard} 为国际上通用的标准物(氮同位素标准物采用大气氮)的重轻同位素丰度之比。使用SPSS 19.0软件进行统计学分析。

2 结果与分析

2.1 环境参数

南海北部海水物理性质的时空差异非常明显(图2)。夏季5 m层海水平均温度为29.71℃,显著高于冬季(25.31℃, $P < 0.01$)。而夏季200 m层水温的平均值为14.10℃,低于冬季(15.36℃, $P < 0.05$),说明夏季水温随深度增加变化显著。冬季5 m和50 m层平均水温分别为25.31℃和25.00℃,变化不大,表层高温海水出现明显的下沉现象。海水盐度在深度较浅的水层出现明显的季节变化,5 m层和50 m层海水盐度夏季的平均值为33.63和34.32,低于冬季5 m层的34.49($P < 0.01$)和50 m层的34.60($P < 0.05$),其余水层季节变化不明显。冬季海水盐度随深度增加变化不明

显;而夏季表层海水盐度低于盐度稳定的深层海水。

夏季5 m层叶绿素a质量浓度的平均值为 $0.11 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,低于冬季($0.34 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$, $P < 0.01$);夏季75 m层叶绿素a质量浓度的平均值为 $0.33 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$,却高于冬季的 $0.18 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ($P < 0.05$)。叶绿素a质量浓度存在明显的垂直深度变化,夏季高值多出现在50 m和75 m水层,冬季多出现在5 m和50 m水层。

2.2 南海北部浮游动物生物量

南海北部浮游动物生物量的分布存在明显的空间差异(图3)。夏季浮游动物生物量的最高值出现在位于珠江口的C1站($13.62 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$);其次是东沙群岛附近的C8站($7.54 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$)和C6站($7.09 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$);台湾海峡南部C5站的生物量也高(6.57

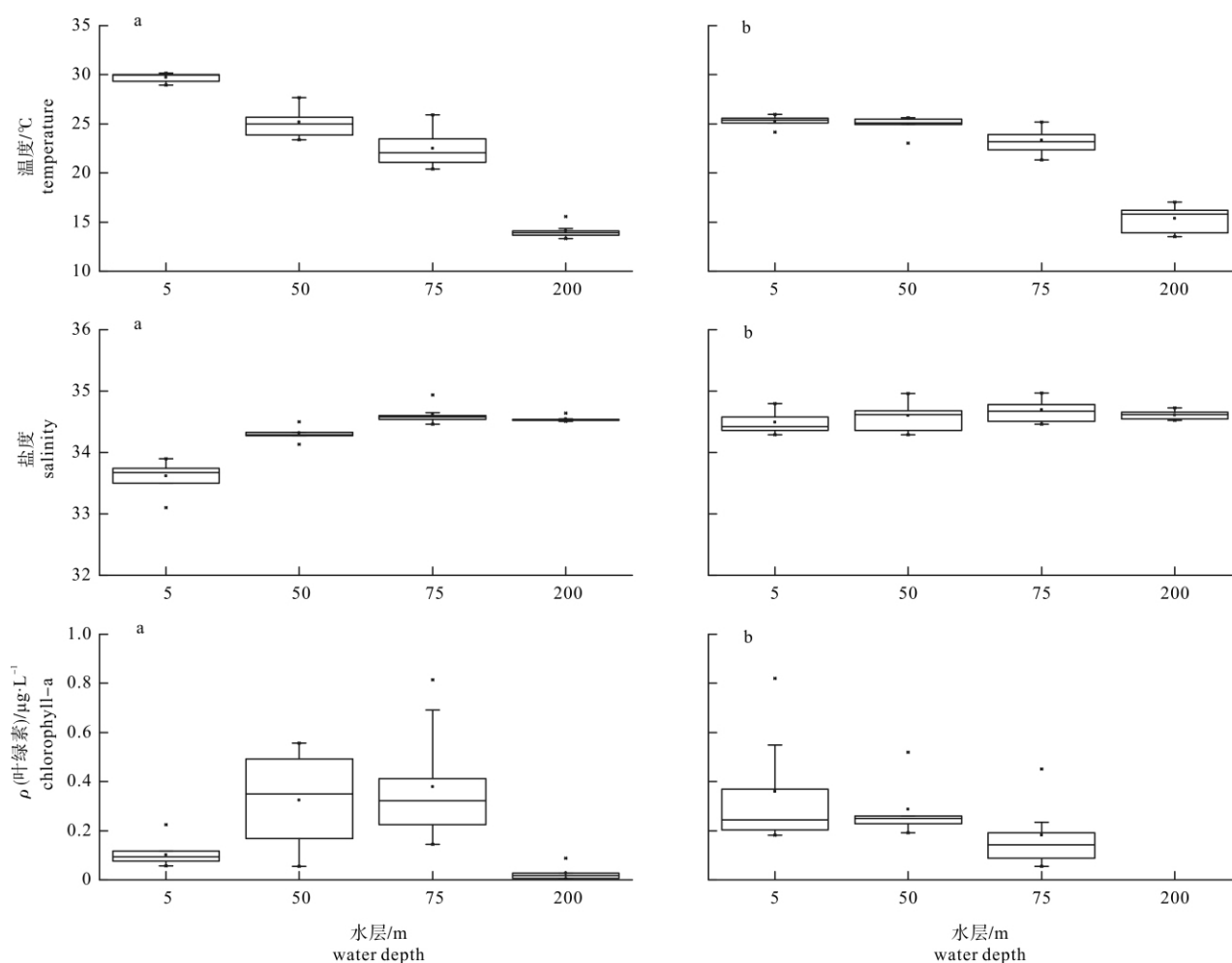


图2 水温、盐度和叶绿素a的季节和水层比较

a. 夏季; b. 冬季; 冬季200 m水层叶绿素a平均质量浓度 $< 0.01 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (未列出)

Fig. 2 Seasonal and vertical variation of temperature, salinity and concentration of chlorophyll-a

a. summer; b. winter; the average concentration of chlorophyll-a at the depth of 200 meters in winter was below $0.01 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ (not shown).

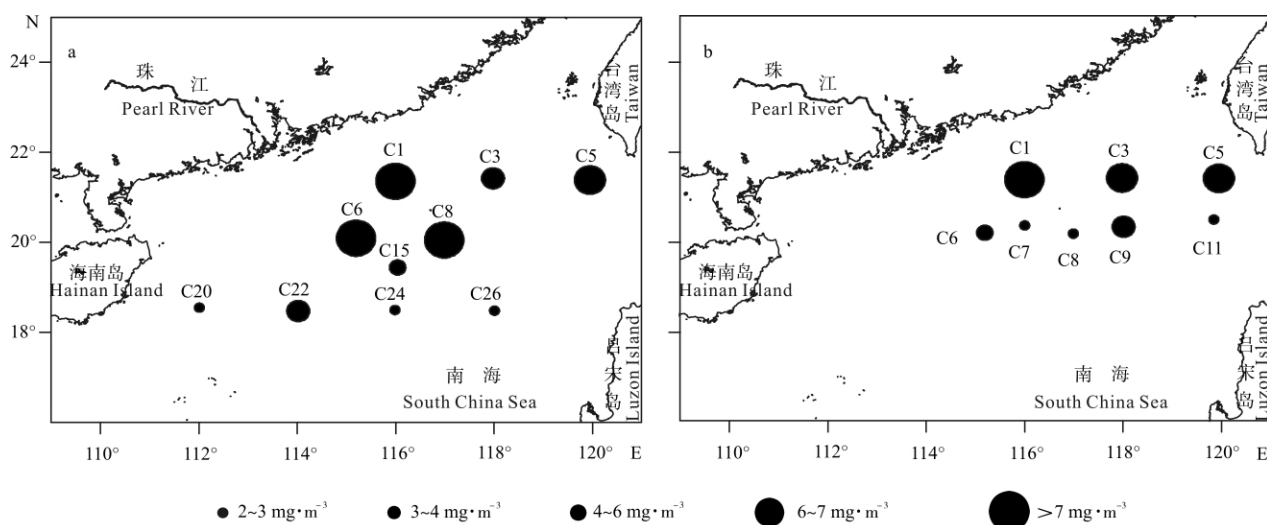


图3 南海北部夏季 (a) 和冬季 (b) 浮游动物生物量的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of zooplankton biomass in northern South China Sea in summer (a) and winter (b)

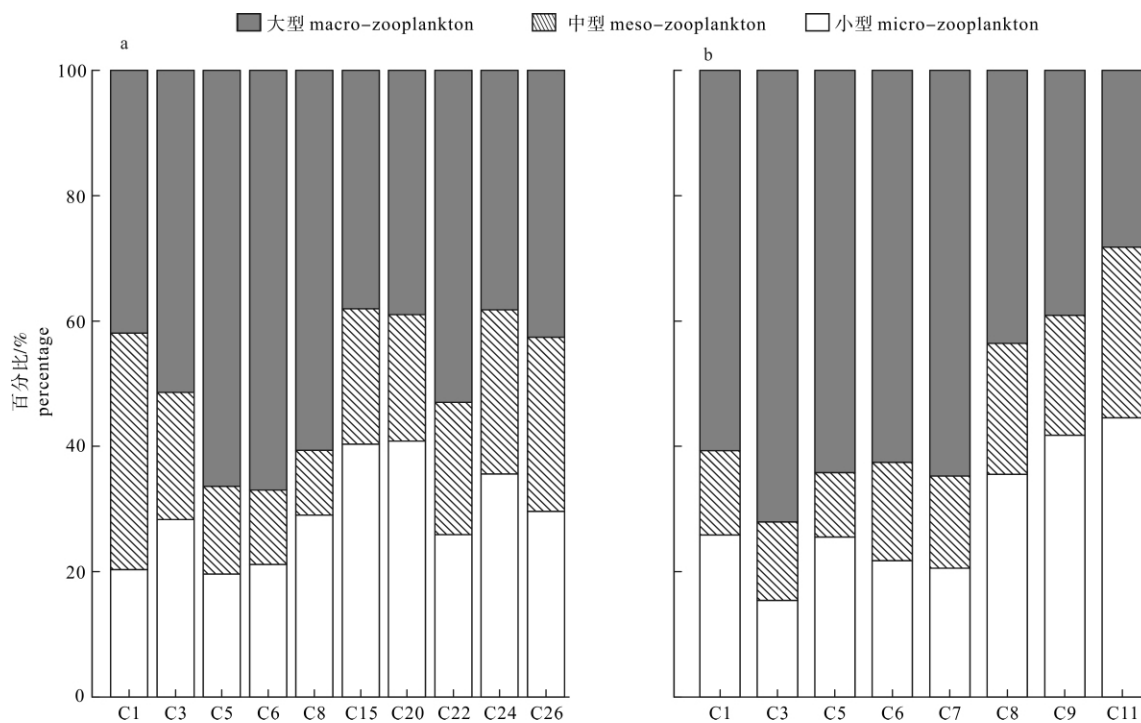


图4 2015年夏季 (a) 和冬季 (b) 各粒级浮游动物生物量的比例

Fig. 4 Proportion of size-fractionated zooplankton biomass to total biomass in summer (a) and winter (b) of 2015

$\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$), 其他开阔深海区站位的浮游动物生物量均较低 (小于 $5.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)。冬季浮游动物生物量的分布特征与夏季相同, 高值也出现在珠江口 (C1 站 $9.01 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$) 和台湾海峡南部海域 (C5 站 $6.81 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

从粒径结构上看, 浮游动物生物量存在粒级和

空间差异。夏季大型浮游动物生物量比例最高 (49.80%, 图 4), 高于小型 (29.09%) 和中型浮游动物 (21.11%); 小型浮游动物高值多出现在开阔的深海区, 中型浮游动物是在陆架区和开阔的深海区, 而大型浮游动物的高值则主要出现在东沙群岛和台湾海峡南部。冬季大型浮游动物生物量

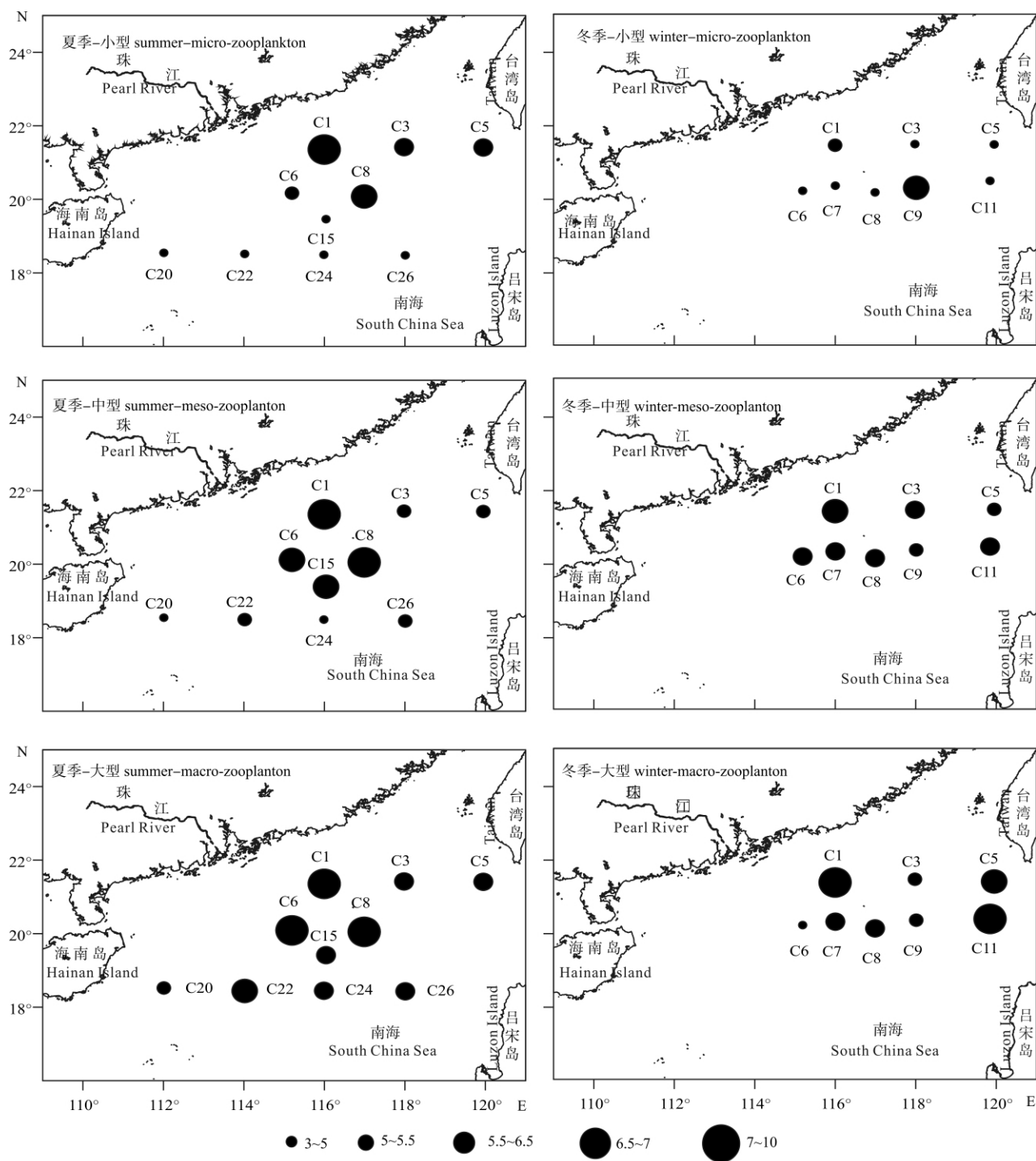


图5 南海北部各粒级浮游动物氮稳定同位素 $\delta^{15}\text{N}$ 值的时空分布

Fig. 5 Seasonal and spatial distribution of $\delta^{15}\text{N}$ value of size-fractionated zooplankton in northern South China Sea

(54.38%)也高于小型和中型浮游动物;小型和中型浮游动物生物量百分含量分布特征与夏季相同,高值也多出现在远海区,大型浮游动物则在台湾海峡南部海域的比例最高。

2.3 南海北部各粒级浮游生物的氮稳定同位素

浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值在夏季 ($P < 0.05$) 和冬季 (P

< 0.01) 都存在显著的粒级差异 (图5)。夏季小型浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值为 5.34 ± 1.10 , 显著低于大型浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值 (6.58 ± 0.99); 夏季中型浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值为 5.75 ± 1.16 , 其中大部分站点的 $\delta^{15}\text{N}$ 值低于大型浮游动物。冬季大型浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值为 6.48 ± 1.53 , 显著高于中型

浮游动物 (5.97 ± 0.52) 和小型浮游动物 (4.64 ± 0.96)。

浮游动物氮稳定同位素出现明显的空间分布变化。夏季各粒级浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值的空间分布差异相似, 高值区都出现在珠江口 (C1 站)、东沙群岛附近 (C6 和 C8 站) 和台湾海峡南部海域 (C5 站), 而开阔深海区站位的稳定同位素值均最低。冬季各粒级浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值的空间差异与夏季相似, 高值区大多也出现在珠江口 (C1 站)、东沙群岛附近 (C7 和 C8 站) 和台湾海峡南部海域 (C5 和 C11 站), 尤其是大型浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值的分布, 其中最大值出现于 C11 站, 为 7.99。

对共同站位分析可知, 浮游动物的氮稳定同位素出现显著的季节变化 ($P < 0.05$), 夏季 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值 (6.53 ± 1.02) 高于冬季 (5.54 ± 1.09)。夏季小型浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值为 6.25 ± 0.73 , 极显著高于冬季 (4.45 ± 0.74 , $P < 0.01$), 夏季 $\delta^{15}\text{N}$ 最高值出现于 C1 站 (7.07)。共同站位各粒级浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值也出现了明显的空间变化, 高值也都分布在珠江口和台湾海峡南部海域。

对浮游动物生物量和 $\delta^{15}\text{N}$ 值进行相关性分析可知, 小型浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值与小型浮游动物生物量 ($P < 0.01$)、中型浮游动物生物量 ($P < 0.05$) 和浮游动物总体生物量 ($P < 0.01$) 都存在明显的相关性, 中型浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值与小型浮游动物生物量 ($P < 0.05$) 和浮游动物总体生物量 ($P < 0.01$) 也有明显的相关性, 大型浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值则与生物量的关系不明显。

3 讨论

受季风、珠江冲淡水、台湾海峡南部上升流和黑潮暖流等水文动力的影响, 南海北部海水温度和盐度季节变化明显, 海水营养盐也具有明显的空间分布特征^[18]。海水营养盐浓度和结构的变化会影响浮游植物的细胞丰度和群落结构^[19-20], 进而影响到浮游动物的生物量。杜明敏等^[21]对中国近海浮游动物的研究就指出水温和盐度是影响浮游动物群落结构最重要的 2 个环境因子。已有研究表明南海北部浮游植物的细胞丰度通常近岸高于外海, 高值区多出现于近岸、珠江口和台湾海峡南部海域^[22-23], 同时浮游植物生物量的高值也存在垂直变化, 浅水区多出现在 10 m 处, 深海区多在次表

层 (50 ~ 75 m)^[24]。2015 年夏季和冬季该研究海区叶绿素 a 质量浓度也能反映这一变化特征。文章结果显示南海北部夏季和冬季浮游动物生物量的高值区也都出现在珠江口和台湾海峡南部上升流海域, 这与浮游植物生物量的分布特征相似。这说明作为浮游植物主要消费者的浮游动物, 它的生物量会受到浮游植物群落结构的影响。

南海北部浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值与南沙海域、黄东海和波罗的海相差不大, 但明显高于里昂湾, 这可能与里昂湾所处的地理位置和复杂的水文条件有关^[27-28]。里昂湾位于地中海西北部, 而地中海是最大的陆间海, 蒸发作用强, 海水盐度可高达 39, 海洋生物也较其他海区稀少。还有研究指出浮游动物夏季 $\delta^{15}\text{N}$ 值要高于冬季^[5, 29], 而表 1 中分析的是冬季里昂湾浮游动物稳定同位素特征, 这可能也是其 $\delta^{15}\text{N}$ 值低的原因之一。

南海北部浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值与其生物量相关性明显, 而浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值的高值也多分布于珠江口、台湾海峡南部, 这说明浮游动物生物量对其氮稳定同位素的空间分布有着明显的影响, 同样的结果也出现于南海南部^[9]。邻近珠江口站位的各粒级浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值在夏季和冬季均较高 (一些粒级浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 出现最高值, 如夏季大型浮游动物的 7.99 和冬季中型浮游动物的 6.53), 可能该区域受珠江径流影响, 营养盐得到大量补充, 刺激了浮游生物的生长^[26]。台湾海峡南部海域浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值也较高, 这可能与台湾海峡南部上升流带来底层丰富的营养盐改变了该海区浮游植物的丰度和群落结构有关^[30]。PETURSDOTTIR 等^[31]对北大西洋中脊锋面飞马哲水蚤 (*Calanus finmarchicus*) 氮稳定同位素研究也发现浮游植物群落的变化可能是导致 $\delta^{15}\text{N}$ 值的区域差异的主要原因。

在海洋浮游食物网中, 体型较大的浮游生物会摄食体型较小的浮游生物, 存在以个体大小为基础的消费关系^[16]。营养级较高的生物其 $\delta^{15}\text{N}$ 值也较高。LOICK 等^[32]研究越南上升流海区浮游生物特征时就指出体型更大的浮游生物会具有更大的 $\delta^{15}\text{N}$ 值和更高的营养位置。此结果也显示南海北部夏季和冬季浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值均有显著的粒径差异, 随粒径增大而增加, 许多研究也都指出浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值具有随体型变大而增加的规律^[7-9, 26, 33]。

表1 不同海域分粒级浮游动物氮稳定同位素

Tab. 1 Different survey areas of stable nitrogen isotope of size-fractionated zooplankton

粒径范围/ μm size fraction	时间 time	$\delta^{15}\text{N}$ 值 stable nitrogen isotope	调查海域 survey area
100 ~ 200	1994 - 1995 年	2.6 ~ 7.7	波罗的海 ^[16]
200 ~ 500	1994 - 1995 年	3.0 ~ 10.5	波罗的海 ^[16]
500 ~ 1 500	1994 - 1995 年	6.4 ~ 9.2	波罗的海 ^[16]
> 160	2002 - 2003 年	6.14 \pm 0.51	渤海湾 ^[25]
100 ~ 200	2009 - 2010 年	4.71 \pm 1.77 (秋) 4.24 \pm 1.86 (春)	黄东海 ^[7]
200 ~ 500	2009 - 2010 年	5.25 \pm 1.88 (秋) 5.39 \pm 1.51 (春)	黄东海 ^[7]
500 ~ 1 000	2009 - 2010 年	7.05 \pm 1.08 (秋) 6.23 \pm 1.04 (春)	黄东海 ^[7]
1 000 ~ 2 000	2009 - 2010 年	7.48 \pm 1.23 (秋) 6.32 \pm 0.98 (春)	黄东海 ^[7]
80 ~ 200	2011 年 1 月	2.49 \pm 0.59	里昂湾 ^[26]
200 ~ 300	2011 年 1 月	2.60 \pm 0.69	里昂湾 ^[26]
300 ~ 500	2011 年 1 月	2.75 \pm 0.74	里昂湾 ^[26]
500 ~ 1 000	2011 年 1 月	3.45 \pm 0.92	里昂湾 ^[26]
1 000 ~ 2 000	2011 年 1 月	3.78 \pm 1.09	里昂湾 ^[26]
> 2 000	2011 年 1 月	1.18 \pm 3.13	里昂湾 ^[26]
180 ~ 380	2013 年 4 - 7 月	3.79 ~ 6.76 (春) 2.53 ~ 6.51 (夏)	南沙海域 ^[9]
380 ~ 500	2013 年 4 - 7 月	5.15 ~ 9.25 (春) 3.12 ~ 6.79 (夏)	南沙海域 ^[9]
< 500	2013 年 4 - 7 月	4.94 ~ 8.18 (春) 4.87 ~ 10.25 (夏)	南沙海域 ^[9]
180 ~ 380	2015 年 7 - 12 月	5.34 \pm 1.10 (夏) 4.64 \pm 0.96 (冬)	南海北部
380 ~ 500	2015 年 7 - 12 月	5.75 \pm 1.16 (夏) 5.97 \pm 0.52 (冬)	南海北部
< 500	2015 年 7 - 12 月	6.58 \pm 0.99 (夏) 6.48 \pm 1.53 (冬)	南海北部

浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值有季节变化, 夏季 $\delta^{15}\text{N}$ 值较高, 而冬季较低^[5,26,29]。与之相符, 此研究结果也显示南海北部夏季浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值高于冬季。季节改变会引起浮游植物群落结构和其 $\delta^{15}\text{N}$ 值出现变化, 进而可能影响浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值。马威等^[23]研究指出南海北部夏季和冬季浮游植物优势种和平均细胞丰度均有季节差异。同样, 季节的改变也会引起浮游动物种群结构的变化, 可能影响其 $\delta^{15}\text{N}$ 值。FANELLI 等^[34]研究大陆坡的食物网结构时发现, 肉食性浮游动物的 $\delta^{15}\text{N}$ 值要高于滤食性浮游动物, 柯志新等^[8]也认为大亚湾浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 值差异可能是由于浮游动物种类的差异造成的。以后需结合各粒级浮游动物的主要类群来进一步研究。

4 结论

南海北部浮游动物生物量和氮稳定同位素空间分布差异明显, 高值区多分布在珠江河口、东沙群

岛和台湾海峡南部海域。浮游动物氮稳定同位素夏季 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值高于冬季, 其中小型浮游动物 $\delta^{15}\text{N}$ 平均值显著高于冬季 ($P < 0.01$)。各粒级浮游动物氮稳定同位素随粒径增大而增加。相关性分析显示, 小型和中型浮游动物氮稳定同位素与浮游动物生物量有明显的相关性, 大型浮游动物氮稳定同位素与浮游动物生物量的相关性则不明显。

致谢: 此文在成文过程中, 得到中国科学院水生生物研究所徐军研究员、姚小燕硕士和王沈硕士在样品测试方面的支持, 谨致谢忱!

参考文献:

- [1] 张武昌, 高尚武, 孙军, 等. 南海北部冬季和夏季浮游哲水蚤类群落 [J]. 海洋与湖沼, 2010, 41 (3): 448-458.
- [2] 周林滨, 谭烨辉, 黄良民, 等. 水生生物粒径谱/生物量谱研究进展 [J]. 生态学报, 2010, 30 (12): 3319-3333.
- [3] FRY B, QUINONES R B. Biomass spectra and stable isotope indi-

- cators of trophic level in zooplankton of the northwest Atlantic [J]. Mar Ecol Prog Ser, 1994, 112 (1/2): 201-204.
- [4] CALBET A, GARRIDO S, SAIZ E, et al. Annual zooplankton succession in coastal NW Mediterranean waters: the importance of the smaller size fractions [J]. J Plankton Res, 2001, 23 (3): 319-331.
- [5] 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]. J Plankton Res, 2014, 36 (1): 145-156.
- [6] 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.
- [7] 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: 中国科学院海洋研究所, 2011: 18-24.
- [8] 柯志新, 黄良民, 徐军, 等. 大亚湾冬季不同粒级浮游生物的氮稳定同位素特征及其与生物量的关系 [J]. 生态学报, 2012, 32 (22): 7102-7108.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 李纯厚, 贾晓平, 蔡文贵. 南海北部浮游动物多样性研究 [J]. 中国水产科学, 2004, 11 (2): 139-146.
- [12] LI K Z, YIN J Q, HUANG L M, et al. Spatial and temporal variations of mesozooplankton in the Pearl River estuary, China [J]. Est Coast Shelf Sci, 2006, 67 (4): 543-552.
- [13] 连喜平, 谭烨辉, 黄良民, 等. 大亚湾大中型浮游动物的时空变化及其影响因素 [J]. 海洋环境科学, 2011, 30 (5): 640-645.
- [14] LI K Z, YAN Y, YIN J Q, et al. Seasonal occurrence of *Calanus sinicus* in the northern South China Sea: a case study in Daya Bay [J]. J Mar Sys, 2016, 159: 132-141.
- [15] 赵明辉, 黄洪辉, 齐占会, 等. 南海北部浮游动物的景观格局分析 [J]. 南方水产, 2010, 6 (6): 41-45.
- [16] 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]. Mar Ecol Prog Ser, 2000, 203: 47-65.
- [17] VANDER ZANDEN M J, 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.
- [18] 石晓勇, 李鸿妹, 韩秀荣, 等. 夏季南海北部典型中尺度物理过程对营养盐及溶解氧分布特征的影响 [J]. 环境科学学报, 2014, 34 (3): 695-703.
- [19] 彭欣, 宁修仁, 孙军, 等. 南海北部浮游植物生长对营养盐的响应 [J]. 生态学报, 2006, 26 (12): 3959-3968.
- [20] 薛冰, 孙军, 李婷婷. 2014 年夏季南海北部浮游植物群落结构 [J]. 海洋学报, 2016, 38 (4): 54-65.
- [21] 杜明敏, 刘镇盛, 王春生, 等. 中国近海浮游动物群落结构及季节变化 [J]. 生态学报, 2013, 33 (17): 5407-5418.
- [22] LEE CHEN Y L, CHEN H Y. Seasonal dynamics of primary and new production in the northern South China Sea: the significance of river discharge and nutrient advection [J]. Deep-Sea Res I, 2006, 53: 971-986.
- [23] 马威, 孙军. 夏、冬季南海北部浮游植物群落特征 [J]. 生态学报, 2014, 34 (3): 621-632.
- [24] 柯志新, 黄良民, 谭烨辉, 等. 2007 年夏季南海北部浮游植物的物种组成及丰度分布 [J]. 热带海洋学报, 2011, 30 (1): 131-143.
- [25] 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种的营养层次 [J]. 科学通报, 2005, 50 (7): 708-712.
- [26] ESPINASSE B, HARMELIN-VIVIEN M, TIANO M, et al. Patterns of variations in C and N stable isotope ratios in size-fractionated zooplankton in the Gulf of Lion, NW Mediterranean Sea [J]. J Plankton Res, 2014, 36 (5): 1204-1215.
- [27] RAIMBAULT P, DURRIEU de MADRON X. Research activities in the Gulf of Lion (NW Mediterranean) with in the 1997-2001 PNEC project [J]. Oceanol Acta, 2003, 26: 291-298.
- [28] ESPINASSE B, CARLOTTI F, ZHOU M, et al. Defining zooplankton habitats in the Gulf of Lion (NW Mediterranean Sea) using size structure and environmental conditions [J]. Mar Ecol Prog Ser, 2014, 506 (7): 31-46.
- [29] KIBIRIGE I, PERISSINOTTO R, NOZAI S. Alternative food sources in zooplankton in a temporarily-open estuary: evidence from $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ [J]. J Plankton Res, 2002, 24 (10): 1089-1095.
- [30] GUO D H, HUANG J Q, LI S J. Planktonic copepod compositions and their relationships with water masses in the southern Taiwan Strait during the summer upwelling period [J]. Con Shelf Res, 2011, 31: 67-76.
- [31] PETURSDOTTIR H, FALK-PETERSEN S, HOP H, et al. *Calanus finmarchicus* along the northern Mid-Atlantic Ridge: variation in fatty acid and alcohol profiles and stable isotope values, $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ [J]. J Plankton Res, 2010, 32 (7): 1067-1077.
- [32] LOICK N, DIPPNER J, DOAN H N, et al. Pelagic nitrogen dynamics in Vietnamese upwelling area according to stable nitrogen and carbon isotope data [J]. Deep-Sea Res II, 2007, 54: 596-607.
- [33] WAITE A M, MUHLING B A, HOLL C M, et al. Food web structure in two counter-rotating eddies based on $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ isotopic analyses [J]. Deep-Sea Res II, 2007, 54 (8/9/10): 1055-1075.
- [34] FANELLI E, CARTES J E, PAPIOL V. Food web structure of deep-sea macrozooplankton and micronekton off the Catalan slope: insight from stable isotopes [J]. J Mar Sys, 2011, 87 (1): 79-89.