

南海南部浮游动物稳定同位素研究——碳稳定同位素*

刘华雪¹, 徐军², 李纯厚¹, 陈作志¹, 黄洪辉¹

1. 广东省渔业生态环境重点实验室, 农业部南海渔业资源开发利用重点实验室, 中国水产科学研究院南海水产研究所, 广东 广州 510300;

2. 中国科学院水生生物研究所, 湖北 武汉 430072

摘要: 文章分析了南海南部海域(108°~117°E; 4°~12°N)春季和夏季不同粒径范围浮游动物碳稳定同位素特征。根据粒级将浮游动物分成三组, 分别是> 500 μm 组(大型)、380~500 μm 组(中型)和 180~380 μm 组(小型)。研究结果显示浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在着显著的季度变化。夏季大型浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值比春季高, 而春季中型和小型浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值比夏季高。单因素方差分析显示, 各粒级浮游动物稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值并无显著性差异。广义加性模型分析结果表明大型和小型浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值与对应粒径的浮游动物生物量没有明显的关系, 与 75m 层盐度呈负相关关系($p<0.05$); 中型浮游动物与环境因素及生物量的关系不明显, 显示水体垂直混合的季节变化对大型和小型浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值有一定的影响。

关键词: 南海; 浮游动物; 碳稳定同位素; 广义加性模型

中图分类号: Q958.885.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2015)04-0059-06

Stable carbon isotope of zooplankton in the southern South China Sea

LIU Hua-xue¹, XU Jun², LI Chun-hou¹, CHEN Zuo-zhi¹, HUANG Hong-hui¹

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

2. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China

Abstract: The stable carbon isotopes of zooplankton based on size fractionation in the southern South China Sea during spring and summer 2013 were investigated. The zooplankton was divided into three groups according to size (> 500 μm , 380~500 μm and 180~380 μm). The mean $\delta^{13}\text{C}$ value of macrozooplankton in summer was higher than that in spring, while meso- and micro-zooplankton showed opposite character. One-way ANOVA result showed no significance between size fractionated zooplankton groups. GAM analysis showed that both macro- and micro-zooplankton showed close relationship to seawater salinity at 75-m depth, while meso-zooplankton was not closely related to environment variables, indicating that vertical mixing also influenced stable carbon isotopes.

Key words: South China Sea; zooplankton; stable carbon isotope; generalized additive model

浮游动物在海洋生态系统中将浮游植物固定的能量向高营养层次传递, 并调控食物网中营养级间的生态效率(Legendre et al, 2008), 是海洋食物网的关键组成部分。在自然生态系统中, $\delta^{13}\text{C}$ 值主要由碳源控制, 而不是生物新陈代谢的分馏作用。从初级

生产者到消费者, 碳同位素的相对丰度变化很小, 平均富集在 0.1%~0.4%。消费者基本保存了食物的 $\delta^{13}\text{C}$ 特征, 因此可用于指示和区分食物的来源, 并用于食物贡献量的计算(崔莹, 2012)。由于生物稳定同位素的富集同时受到食性、发育阶段、环境和饵

收稿日期: 2014-09-15; 修订日期: 2014-12-18。林强编辑

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201403008); 农业部财政重大专项(NFZX2013); 广东省自然科学基金(S2013040016424); 中央级公益性科研院所基本业务费(2013TS07)

作者简介: 刘华雪(1984~), 男, 山东省济宁市人, 博士, 从事海洋生态学研究。E-mail: liuhuaxue@scsfri.ac.cn

通信作者: 黄洪辉。E-mail: huanghh@scsfri.ac.cn

*感谢“南锋”科考船工作人员在调查取样过程中的协助, 陈绵润博士对数据分析的帮助, 谨致谢忱!

料的质量以及样品采集和处理等一系列因素的影响(Bănar et al, 2013), 准确判定影响稳定同位素数值的因素具有一定的难度, 对浮游动物碳稳定同位素开展深入研究有助于了解其食物来源。

国外学者率先利用稳定同位素方法研究了不同海区浮游动物食物来源(Rau et al, 1990; Sholto-Douglas et al, 1991; Fry et al, 1994), 如北太平洋(Hannides et al, 2013)、地中海(Koppelman et al, 2009)和大西洋(Laakmann et al, 2010)等, 国内学者在渤海(蔡德陵等, 2001; 万伟等, 2005)、黄海(蔡德陵等, 2005)、东海(金鑫等, 2012)和南海(郭卫东等, 2002; 陈绍勇等, 2001)也开展了一些研究, 然而关于南海浮游动物稳定同位素的研究较少, 已有研究主要集中在岛礁区(渚壁礁和永暑礁), 关于南沙开阔海域及西南陆架区尚无公开报道。本文根据南海南部海域 2013 年春季和夏季的浮游动物的现场采样, 进行不同粒径浮游动物碳稳定同位素的研究, 研究结果可为南海食物网营养动力学研究提供基础资料。

1 材料和方法

于 2013 年春季(3 月 10 日~4 月 16 日)和夏季(6 月 8 日~7 月 18 日)对南海南部的 15 个站位进行了现场采样(图 1), 具体站位设计参照(刘华雪等, 2015), 其中陆架区站位(A47、A49、A53、A55 和 A56)水深低于 200m, 其余站位水深均超过 200m。

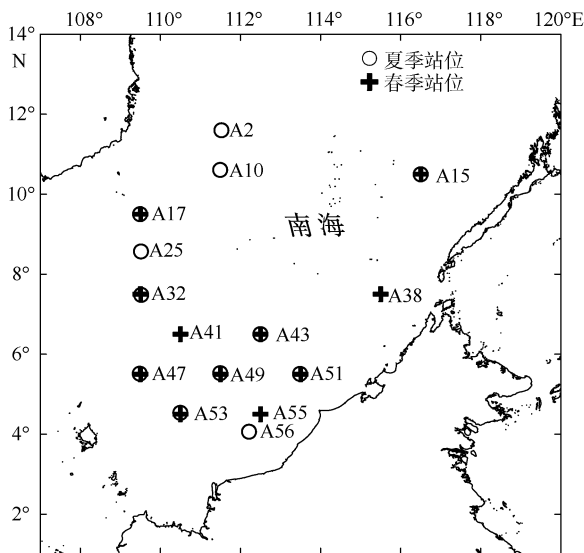


图 1 南海南部浮游动物采样站位图

Fig. 1 Sampling sites of zooplankton in the southern South China Sea

1.1 样品采集与分析

温度、盐度和叶绿素荧光值由温盐深仪(CTD)

现场测定。本文将浮游动物的粒径梯度设为 180~380 μm 组(小型)、380~500 μm 组(中型)和大于 500 μm 组(大型)。使用 型浮游动物网(mesh=160 μm)采集 0~200m 水柱内浮游动物(水深小于 200m 时, 拖至底层), 将样品置于盛有已过滤海水的水桶中, 阴凉处排空, 将排空后的样品依次用 500、380 和 180 μm 的筛网过滤分离(Rau et al, 1990; Rolff, 2000; 柯志新等, 2012)。蒸馏水反复冲洗筛网后, 用 GF/C 滤膜收集 3 种粒径浮游动物的样品, 滤膜用锡纸包裹后置于 -20 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存, 到实验室于 60 $^{\circ}\text{C}$ 烘干 24h 至恒重。所有用于样品富集的 GF/C 滤膜经过 450 $^{\circ}\text{C}$ 预灼烧 4h 以除去可能的有机质的影响, 保存在干燥器中。

将烘干后的各粒径浮游动物样品用研钵研磨成均匀粉末, 放入干燥器保存留待 $\delta^{13}\text{C}$ 值的分析。测定 $\delta^{13}\text{C}$ 值时, 在实验室中用 1mol·L⁻¹ 的盐酸酸化(去除碳酸盐的影响)样品, 后用去离子水冲洗, 干燥研磨。稳定同位素质谱仪-元素分析联用仪为 Finnigan delta plus 和 Flash EA1112, 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了 2~3 次复测。

1.2 数据分析

$$\delta \text{ 值的计算: } \delta = \frac{R_{\text{sample}} - R_{\text{standard}}}{R_{\text{standard}}} \times 1000 \text{ (Zanden et al, 1999).}$$

式中 δ 代表 ^{13}C ; R_{sample} 代表所测的同位素比值($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$), R_{standard} 是国际通用标准物的重轻同位素丰度之比, 碳稳定同位素标准采用美洲拟箭石(Pee Dee Belemnite, 即 PDB)。使用 SPSS 19 软件对两个季节的稳定同位素 δ 值进行单因素方差分析(one-way ANOVA)。使用 R 3.0.2 软件, 以环境变量(混合层深度 UML、表层和 75m 的温盐)和生物变量(表层和 75m 层叶绿素荧光值, 浮游动物干重)作为解释变量, 碳同位素值作为响应变量构建广义加性模型(generalized additive model, GAM)。GAM 模型分析的最主要功能在于检视生物因变量和自变量之间的非线性关系, 并发现其中的关联, 以更深入地探讨稳定同位素与影响因子间的关系, 及确定每个因子的重要程度(Chen et al, 2012), 并利用赤池信息量准则(Akaike's Information Criterion, AIC)检验模型的拟合程度。

2 结果

春季, 大型浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为 -24.02~-19.80, 平均值为 -22.36 \pm 1.14, 最高出现在南沙中部海域(A49 站), 最低出现在越南东南部海域(A17 站); 中型浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围为 -23.03~-20.96, 平均值为 -22.09 \pm 0.66, 最高出现在 A49, 最

低出现在 A43 站；小型浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围为 $-23.02\sim 20.63$ ，平均值为 -22.38 ± 0.74 ，最高出现在 A49 站，最低出现在 A47 站。

夏季，大型浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化范围为 $-24.52\sim -19.97$ ，平均值为 -21.76 ± 1.04 ，最低出现在 A47 站，其余站位相差不大；中型浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围为 $-24.14\sim 21.96$ ，平均值为 -22.62 ± 0.71 ，只有 A49 站和 A10 站较低；小型浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化范围为 $-23.17\sim 21.82$ ，平均值为 -22.47 ± 0.40 ，低值区主要集中在研究海域的东部。同春季相比，夏季

大型浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值升高(图2)，中型和小型浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值略降低。

单因素方差分析显示，各粒径浮游动物稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值并无显著差异性。GAM 分析显示大型和小型浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值与对应粒径的浮游动物生物量没有明显的关系(表1)，但与75m层盐度呈负相关关系($p<0.05$)，而中型浮游动物与环境因素及生物量的关系不明显。同其他海域(Bănaru et al, 2013; Espinasse et al, 2014)对比，南沙海域浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值处于中等水平(表2)。

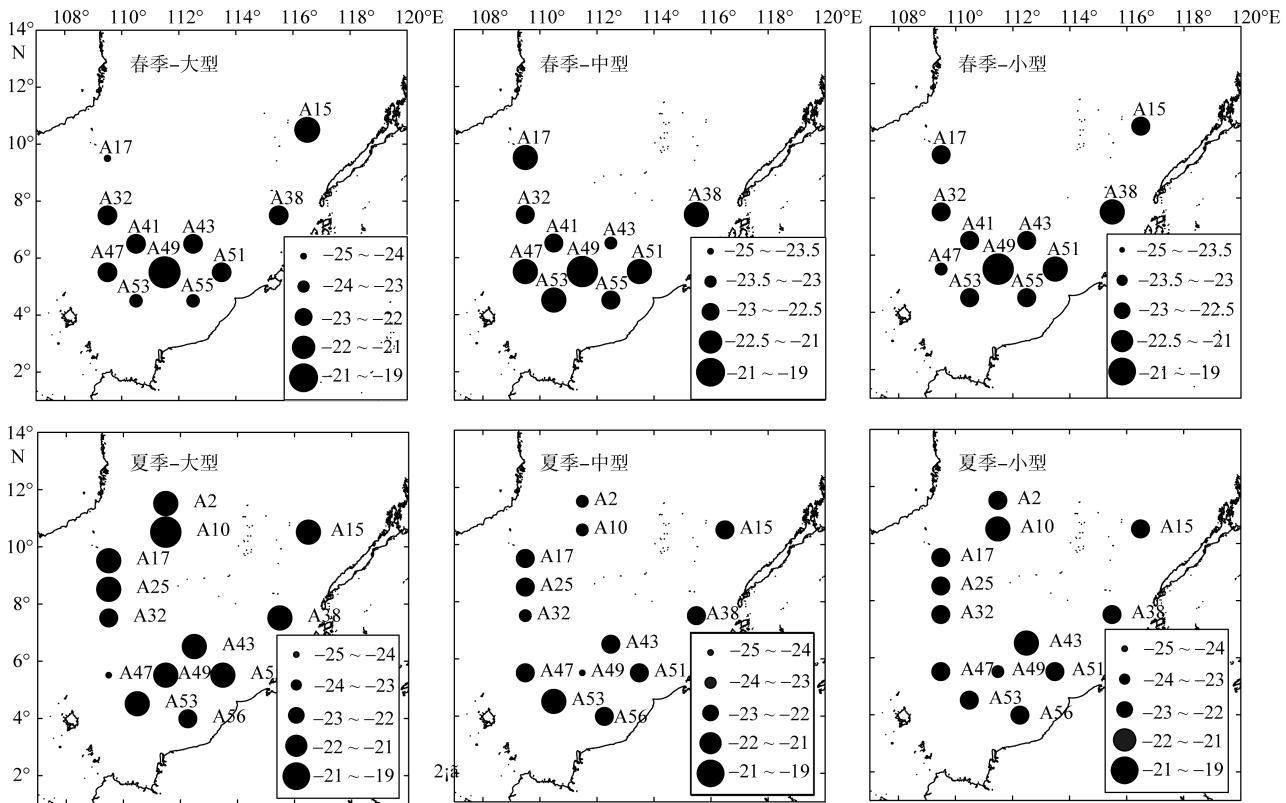


图2 各粒径浮游动物碳稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值空间分布

Fig. 2 Spatial distributions of $\delta^{13}\text{C}$ value of size fractionated zooplankton in spring (top panels) and summer (bottom)

表1 稳定同位素广义加性模型分析结果

Tab. 1 Results of generalized additive models (GAM) analysis of stable isotopes

参数	$\delta^{13}\text{C}$ -大型		$\delta^{13}\text{C}$ -中型		$\delta^{13}\text{C}$ -小型	
	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
混合层深度	0.793	0.396	2.527	0.143	1.483	0.265
0m 层温度	3.519	0.063	0.560	0.472	0.057	0.816
75m 层温度	1.946	0.188	2.862	0.122	3.408	0.073
0m 层盐度	1.783	0.207	0.519	0.488	0.029	0.918
75m 层盐度	1.602	0.015*	3.908	0.056	9.760	0.004*
0m 层荧光值	6.923	0.154	0.989	0.343	2.070	0.174
75m 荧光值	2.314	0.154	2.346	0.145	0.730	0.413
大型浮游动物生物量	2.769	0.122	/	/	/	/
中型浮游动物生物量	/	/	0.619	0.551	/	/
小型浮游动物生物量	/	/	/	/	2.023	0.185
偏差解释率	0.707		0.690		0.753	
赤池信息量准则	-252		-255.5		-282.7	

注: *表示 $p<0.05$; *F* 表示自由度

表 2 部分海域浮游动物碳稳定同位素比率

Tab. 2 Partial results of stable carbon isotope ratios of zooplankton

粒径范围/ μm	时间	$\delta^{13}\text{C}$ 值	区域	文献
>160	2001 年 5 月	-24.09 ~ -22.82	黄东海	蔡德陵, 2005
100~200	1994 年~1995 年	-26.5 ~ -19.4	波罗的海	Rolff, 2000
200~500	1994 年~1995 年	-26.1 ~ -21.7	波罗的海	Rolff, 2000
500~1500	1994 年~1995 年	-24.9 ~ -22.1	波罗的海	Rolff, 2000
80~200	2009 年~2010 年	-22.49 \pm 2.30	马赛湾	Bănaru et al, 2013
200~300	2009 年~2010 年	-23.08 \pm 2.18	马赛湾	Bănaru et al, 2013
300~500	2009 年~2010 年	-23.00 \pm 2.38	马赛湾	Bănaru et al, 2013
500~1000	2009 年~2010 年	-23.05 \pm 2.12	马赛湾	Bănaru et al, 2013
1000~2000	2009 年~2010 年	-21.69 \pm 1.82	马赛湾	Bănaru et al, 2013
>2000	2009 年~2010 年	-21.19 \pm 1.71	马赛湾	Bănaru et al, 2013
80~200	2010 年~2011 年	-22.97 \pm 0.59(春); -22.09 \pm 0.37(冬)	里昂湾	Espinasse et al, 2014
200~300	2010 年~2011 年	-23.66 \pm 0.54(春); -22.35 \pm 0.49(冬)	里昂湾	Espinasse et al, 2014
300~500	2010 年~2011 年	-23.43 \pm 0.46(春); -22.16 \pm 0.59(冬)	里昂湾	Espinasse et al, 2014
500~1000	2010 年~2011 年	-22.91 \pm 0.36(春); -21.60 \pm 0.48(冬)	里昂湾	Espinasse et al, 2014
1000~2000	2010 年~2011 年	-22.89 \pm 0.40(春); -21.30 \pm 0.64(冬)	里昂湾	Espinasse et al, 2014
>2000	2010 年~2011 年	-23.44 \pm 0.82(春); -21.32 \pm 1.84(冬)	里昂湾	Espinasse et al, 2014
180~380	2013 年 4~7 月	-22.38 \pm 0.74(春); -21.47 \pm 0.40(夏)	南沙海域	本文
380~500	2013 年 4~7 月	-22.09 \pm 0.66(春); -22.62 \pm 0.71(夏)	南沙海域	本文
>500	2013 年 4~7 月	-22.36 \pm 1.14(春); -21.76 \pm 1.04(夏)	南沙海域	本文

3 讨论

碳稳定同位素值出现粒径分化, 夏季大型浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值升高, 这可能是因为不同季节和环境条件下, 碳稳定同位素值出现变化。浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值常常与环境参数(温度, 营养盐等)的变化相符合(Bănaru et al, 2013), 此外与浮游植物种类和颗粒有机碳组成有一定关联, 波罗的海的浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值全年呈现双峰式格局, 均出现在赤潮发生期间(Rolff et al, 2000)。本研究中, 夏季水柱水温大约比春季高 0.4~0.6 $^{\circ}\text{C}$, 反映了水体环境特征出现了季节变化, 而大型浮游动物的生物量占比也出现了夏季升高的现象, 说明环境变化影响到了浮游动物组成和生物量。

南海南部浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值随粒径的增大而增大, 与渤海的结果(蔡德陵 等, 2001)和里昂湾(Espinasse et al, 2014)有一定相似性。本研究中浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值受环境条件季节变化的影响十分明显, 这可能是环境变化影响了浮游动物种类组成和生物量(刘华雪 等, 2015), 进而影响到了浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值。

水体的物理性质可以影响浮游动物稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值的大小, 而垂直混合是浮游生物和有机质垂直分布的关键影响因素。GAM 分析显示 75m 盐度变化对大型和小型浮游动物稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值大小有一定的影响(图 3)。

75m 层盐度在一定程度上可以反映水体的垂直混合状况, 季节变化引起的混合层深度和垂直混合的变化, 影响水柱中营养盐浓度和浮游生物种类组成, 进而影响浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值。这种现象同样存在于里昂湾(Espinasse et al, 2014)、马赛湾(Bănaru et al, 2013)和加泰罗尼亚陆坡区(Fanelli et al, 2011); 冬季和春季垂直混合较好, 夏季层化加强, 季节变化引起的环境变化影响了 $\delta^{13}\text{C}$ 值。75m 盐度变化对中型浮游动物稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值无明显影响, 具体原因有待进一步探讨。

4 结论

南沙海域各粒级浮游动物稳定同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值并无显著差异, 但浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值存在着显著的季度变化。同春季相比, 夏季大型浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值

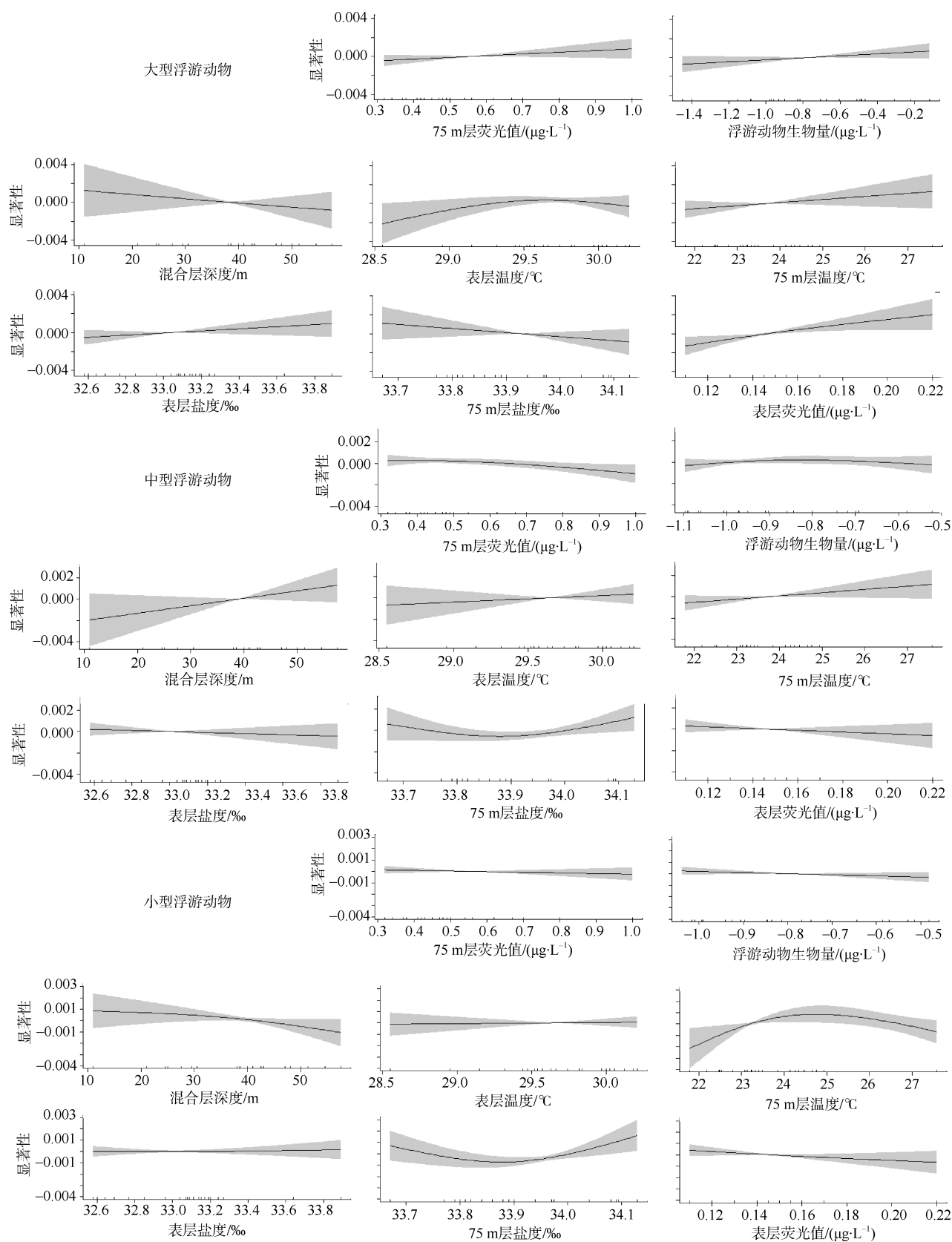


图3 浮游动物碳稳定同位素的广义加性模型分析

Fig. 3 Generalized Additive Model analysis of carbon stable isotopes

升高, 而中型和小型浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 平均值略有降低。环境条件的季节变化和水体垂直混合强度对大

型和小型浮游动物 $\delta^{13}\text{C}$ 值有一定的影响, 对中型浮游动物无明显影响。

参考文献

- 蔡德陵, 王荣, 毕洪生, 2001. 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, 21(8): 1354–1359.
- 蔡德陵, 李红燕, 唐启升, 等. 2005. 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, 35 (2): 123–130.
- 陈绍勇, 周伟华, 吴云华, 等. 2001. 南沙珊瑚礁生态系生物体中 $\delta^{13}\text{C}$ 的分布[J]. 海洋科学, 25 (6): 4–7.
- 崔莹. 2012. 基于稳定同位素和脂肪酸组成的中国近海生态系统物质流动研究[D]. 上海: 华东师范大学: 6–10.
- 郭卫东, 杨逸萍, 吴林兴, 等. 2002. 南沙渚碧礁生态系营养关系的稳定碳同位素研究[J]. 台湾海峡, 21(1): 94–101.
- 金鑫, 李超伦, 刘梦坛. 2012. 基于脂肪酸标记法和碳氮稳定同位素比值法的东海水母常见种的食性分析[J]. 海洋与湖沼, 43(3): 486–493.
- 柯志新, 黄良民, 徐军, 等. 2012. 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, 32(22): 7102–7108.
- 刘华雪, 徐军, 李纯厚, 等. 2015. 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, 34(2): 32–38.
- 万炜, 胡建英, 安立会, 等. 2005. 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, 50(7): 708–712.
- BĂNARU D, CARLOTTI F, BARANI A, et al. 2013. Seasonal variation of stable isotope ratios of size-fractionated zooplankton in the Bay of Marseilles (NW Mediterranean Sea) [J]. Journal of Plankton Research, 36(1): 145–156.
- CHEN M R, LIU H B, CHEN B Z. 2012. Effects of dietary essential fatty acids on reproduction rates of a subtropical calanoid copepod, *Acartia erythraea* [J]. Marine Ecology Progress Series, 455: 95–110.
- ESPINASSE B, VIVIEN M H, TIANO M, et al. 2014. Patterns of variations in C and N stable isotope ratios in size-fractionated zooplankton in the Gulf of Lion, NW Mediterranean Sea [J]. Journal of Plankton Research, 36(5): 1204–1215.
- FANELLI E, CARTES J E, PAPIOL V. 2011. Food web structure of deep-sea macrozooplankton and micronekton off the Catalan slope: Insight from stable isotopes [J]. Journal of Marine Systems, 87: 79–89.
- FRY B, QUIONES R B. 1994. Biomass spectra and stable isotope indicators of trophic level in zooplankton of the northwest Atlantic [J]. Marine Ecology Progress Series, 112: 201–204.
- HANNIDES C C S, POPP B N, CHOY C A, et al. 2013. Midwater zooplankton and suspended particle dynamics in the North Pacific Subtropical Gyre: A stable isotope perspective [J]. Limnol Oceanogr, 58(6): 1931–1946.
- KOPPELMANN R, SCHNACK R B, MOBIUS J, et al. 2009. Trophic relationships of zooplankton in the eastern Mediterranean based on stable isotope measurements [J]. Journal of Plankton Research, 31: 669–686.
- LAACKMANN S, AUDEL H. 2010. Longitudinal and vertical trends in stable isotope signatures ($\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$) of omnivorous and carnivorous copepods across the South Atlantic Ocean [J]. Marine Biology, 157: 463–471.
- LEGENDRE L, RIVKIN R B. 2008. Planktonic food webs: Microbial hub approach [J]. Marine Ecology Progress Series, 365: 289–309.
- RAU G H, TEYSSIE J L, RASSOULZADEGAN F, et al. 1990. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ variations among size-fractionated marine particles: Implications for their origin and trophic relationships [J]. Marine Ecology Progress Series, 59: 33–38.
- ROLFF C. 2000. Seasonal variation in C and N of size-fractionated plankton at a coastal station in the northern Baltic proper [J]. Marine Ecology Progress Series, 203: 47–65.
- SHOLTO-DOUGLAS A D, FIELD J G, JAMES A G, et al. 1991. $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ and $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ isotope ratios in the Southern Benguela Ecosystem: indicators of food web relationships among different size-classes of plankton and pelagic fish differences between fish muscle and bone collagen tissues [J]. Marine Ecology Progress Series, 78: 23–31.
- ZANDEN J M V, RASMUSSEN B J. 1999. Primary consumer $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{15}\text{N}$ and the trophic position of aquatic consumer[J]. Ecology, 80(4): 1395–1404.