

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2014.01103

2009—2010年南海北部浮游有孔虫通量和稳定同位素季节变化及其对东亚季风的响应

王小华¹, 陈荣华¹, 赵庆英¹, 陈建芳¹, 冉莉华¹, Wiesner M G²

(1. 国家海洋局 第二海洋研究所, 杭州 310012;

(2. 德国汉堡大学 生物化学和海洋化学研究所, 汉堡 D-20146)

摘要:通过对南海北部 2009—2010 年获得的浅层、中层和深层时间系列沉积物捕获器的样品分析,发现浮游有孔虫总通量和主要属种 *Globigerinoides ruber*, *Globigerinoides sacculifer*, *Pulleniatina obliquiloculata* 和 *Neogloboquadrina dutertrei* 的通量和百分含量存在明显的季节性变化,在东北季风和西南季风盛行期出现高值,特别在冬季风期间高值明显,在季风间歇期出现低值,展示出“双峰型”通量模式。浮游有孔虫通量与颗粒总通量、有机碳通量、总碳通量、总氮通量、碳酸钙通量和蛋白石通量变化一致,随叶绿素 a 浓度和风速大小变化而改变,表明南海北部生源颗粒通量主要受季风影响的表层生产力所控制。浮游有孔虫壳体氧同位素与表层海水温度的季节变化相吻合。壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 主要受海水温度变化的影响,不同深度属种的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化反映了上层海水温度梯度。此外,壳体碳同位素值总体上在东亚季风强盛期低、季风间歇期高,与表层海水中叶绿素 a 浓度和海表风速的变化趋势相反,说明浮游有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 值反映了水体营养和表层生产力的变化。

关键词:沉积物捕获器;浮游有孔虫;氧碳同位素;东亚季风;南海北部

中图分类号:P736.4

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2014)01-0103-13

运用时间系列沉积物捕获器对水柱中沉降颗粒进行时空尺度上的高分辨率通量测定,并进行多学科综合研究来考察颗粒物质的来源、组成、时空变化及控制因素,可以揭示东亚季风运行特点和发展规律。自 1987 年中德合作在南海北部布放沉积物捕获器以来,国内外学者用沉积物捕获器样品做了大量关于东亚季风季节变化方面的研究。在微生物学方面,陈荣华^[1-2]、林洪瑛^[3]、成鑫荣^[4]、万随^[5]、Lin H-L 等^[6-7]对浮游有孔虫通量和壳体氧碳同位素变化规律与东亚季风的联系进行过研究;郑玉龙等^[8]对 1987—1988 年南海北部几个特征硅藻种的通量和百分含量随季节的变化情况做了初步研究;王汝建等^[9]对 1993—1995 年南海中部硅质生物,主要是放射虫及其不同属种的通量季节变化进行了分析;冉莉华等^[10]对 1987—1988 年南海北部和 1992—1993 年南海中部硅藻通量的季节性变化及其对东亚季风的响应做了系统研究。在有机地球

化学方面,陈建芳^[11-14]和徐鲁强等^[15-16]利用南海中、北部沉积物捕获器样品,对碳酸钙、蛋白石等沉降颗粒通量、糖类和氨基酸等有机分子化合物组分、海表初级生产力和输出生产力等随海面风速、海表温度、叶绿素 a 通量等海水理化条件的季节变化做了大量研究。

本文通过对南海北部沉积物捕获器中有孔虫进行属种鉴定和定量统计,挑选有孔虫进行氧碳同位素分析,结合颗粒总通量、有机碳通量、总碳通量、总氮通量、碳酸钙通量和蛋白石通量等测试结果,并与现代海洋水文资料(叶绿素 a 浓度、SST 和海表风速)进行对比分析,以揭示浮游有孔虫通量、海洋沉降颗粒、初级生产力和东亚季风之间的关系和其内在作用机制。根据浅、中、深层有孔虫和其他颗粒通量的递变关系,揭示沉降颗粒在水柱中的溶解作用,旨在为古海洋学和南海现代生物地球化学过程研究提供基础性资料。

基金项目:国家自然科学基金重点基金项目(91128212);国家自然科学基金青年基金项目(41006034)

作者简介:王小华(1988—),男,硕士研究生,主要从事海洋沉积学与古海洋学研究。E-mail: xhwung@163.com

通讯作者:陈荣华(1955—),男,研究员,主要从事海洋沉积学与古海洋学研究。E-mail: chrh@mail.hz.zj.cn

收稿日期:2013-10-10;改回日期:2013-11-08。张光威编辑

1 材料与方法

本次研究所用材料由 Honjo-Mark VII 型沉积物捕获器采集,捕获器的布放、回收与样品采集、处理按文献^[17]的方法。自 2009 年 6 月 27 日至 2010 年 5 月 13 日在南海北部 SCS-N-03 站(18°31'N、

115°56'E,水深 3 736 m)获时间系列样品 60 个。该站样品来自 3 个不同深度的捕获器,其中浅层(1 003 m)样品 20 个,中层(2 188 m)样品 20 个,深层(3 226 m)样品 20 个。所有样品采集的时间间隔为 16 天(图 1)。对比分析所用表层海水温度(SST)、风速资料来自 NOAA 时间序列数据库 NCEP/NCAR 再分析项目,为了和捕获器样品数据对比,其时间分辨率取 16 天平均,空间分辨率达到度,其中风速是根据经向风和纬向风的矢量和计算而得。表层海水月均叶绿素 a 浓度数据根据海色遥感技术 SeaWiFS 资料反演而得。虽然其时空分辨率与实测的海洋水文资料存在一定差异,但基本上可以反映海水环境变化的大致趋势。所用颗粒总通量(TPF)、有机碳通量(OCF)、总碳通量(TCF)、总氮通量(TNF)、碳酸钙通量 CaCO_3F 和蛋白石通量(OpF)由德国汉堡大学生物化学和海洋化学研究所提供。

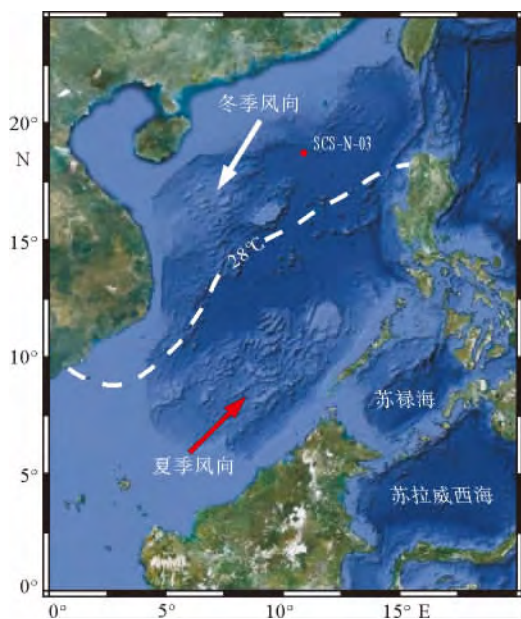


图 1 沉积物捕获器布放站位

Fig. 1 Location of the sediment trap SCS-N-03 in the South China Sea

样品按照标准微体化石处理方法,由于本次样品量较少,秤干重 50 mg,加 40 mL 去离子水浸泡两天后,用 40 kHz 的超声波振动数秒使其分散,再过 63 μm 孔径的铜筛、40 $^{\circ}\text{C}$ 条件下烘干,然后取大于 154 μm 的组分挑尽有孔虫,进行浮游有孔虫通量和百分含量分析。浮游有孔虫属种鉴定依据 Bé 的方法^[18],本次研究获取的样品量较少,将挑选出的大于 154 μm 的有孔虫壳体全部统计计数,未做进一步分样处理;根据大于 154 μm 壳体各属种的统计

数(N)、所分析样品量占整个样品量的份额(P)、沉积物捕获器的已知集样面积(S)和每个样品的采样时间(t)等参数计算属种通量 $F = \frac{N}{P|S|t}$,其中 P 值为本次称量干重/样品干重,S 值取 0.509 m^2 ^[17],t 值取 16;属种鉴定实验在国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室完成。

从样品中挑取新鲜洁净无沾污、壳径介于 300~360 μm 的 *Globigerinoides ruber* (14 枚/样)和介于 360~440 μm 的 *Globigerinoides sacculifer* (8 枚/样)浮游有孔虫壳体,加无水酒精(浓度 $\geq 99.7\%$),在震荡频率为 40 kHz 的超声波清洗器(Branson 200)中清洗数秒,倒去浊液后,将样品置于 60 $^{\circ}\text{C}$ 的烘箱中烘干,后放入碳酸盐制备装置(Kiel III)的样品瓶中,在 70 $^{\circ}\text{C}$ 下经正磷酸溶解后放出 CO_2 ,在稳定同位素比值谱仪 Finnigan-MAT 253 上分析测定壳体的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ ^[4]。样品测试在同济大学海洋地质国家重点实验室完成。精度标准参照中国国家碳酸岩标准(GBW04405)和国际标准(NBS19)。 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 的标准偏差分别为 0.08‰和 0.068‰。

2 有孔虫指标与东亚季风的关系

2.1 浮游有孔虫通量

从南海北部 2009 年 6 月至 2010 年 5 月间沉积物捕获器样品中,共鉴定出 16 种浮游有孔虫,其中含量大于 1% 的有 *G. ruber*、*G. sacculifer*、*P. obliquiloculata*、*N. dutertrei*、*G. glutinata* 和 *G. bulloides*。浅层、中层与深层捕获器中浮游有孔虫总通量变化范围分别为 89~1 526、24~539 和 20~802 枚 $\cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (表 1、2、3;图 2),平均通量分别为 362 枚 $\cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 、216 枚 $\cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 191 枚 $\cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。从浅层到深层通量逐渐降低,特别是季风盛行期表现突出,这与表征海洋表层初级生产力的有机碳通量和碳酸钙通量相吻合,表明沉降颗粒在水柱中下沉过程中遭受海水的溶解作用。在季风盛行期间海水分层作用明显,溶解作用加剧,表层与深层颗粒通量差异较大;而季风转向期混合作用加强,溶解作用相对季风盛行期较弱,表-深差异相对较小(图 2)。而并非每个样品均遵守表层、中层、深层有孔虫和颗粒通量逐渐减少的规律,这可能是由于这些沉积颗粒随海水运动在水体中的横向迁移有关。

热带表层种 *G. ruber* 和 *G. sacculifer* 的通量的

高峰值出现在 2009 年 7、8 月和 11 月至 2010 年 3 月两个夏季风和冬季风盛行期间(图 2)。浅层、中层与深层捕获器中浮游有孔虫 *G. ruber* 通量变化范围分别为 2~436、2~175 和 2~90 枚·m⁻²·d⁻¹(表 1、2、3;图 2),平均通量分别为 93 枚·m⁻²·d⁻¹,49 枚·m⁻²·d⁻¹和 30 枚·m⁻²·d⁻¹,冬季风期间(11 月至翌年 3 月)三层月平均通量为 74 枚·m⁻²·d⁻¹,夏季风期间(7、8 月)三层月平均通量为 48 枚·m⁻²·d⁻¹,季风间期(其余月份)三层月平均通量为 33 枚·m⁻²·d⁻¹; *G. sacculifer* 通量变化范围分别为 38~454、14~196 和 7~317 枚·m⁻²·d⁻¹,平均通量分别为 137 枚·m⁻²·d⁻¹,88 枚·m⁻²·d⁻¹和 89 枚·m⁻²·d⁻¹,冬季风期间(11 月至翌年 3 月)三层月平均通量为 118 枚·m⁻²·d⁻¹,夏季风期间(7、8 月)三层月平均通量为 94 枚·m⁻²·d⁻¹,季风间期(其余月份)三层月平均通量为 82 枚·m⁻²·d⁻¹;由此可见,两者通量在季风期间高于季风间期,特别是东季风期间较高。两者百分含量全年较高,*G. ruber* 在浅、中、深层捕获器中占浮游有孔虫群的年平均百分含量分别为 21.7%、23.0%和 19.6%;*G. sacculifer* 在浅、中、深层捕获器中占浮游有孔虫群的年平均百分含量分别为 44.5%、46.2%和 45.8%(图 3),各层捕获器中 *G. sacculifer* 平均百分含量约为 *G. ruber* 平均百分含量的 2 倍。*G. ruber* 和 *G. sacculifer* 通量在冬季风期间出现高值,而其相对丰度在冬季风期间相对较低,这是因为 *P. obliquiloculata* 和 *N. dutertrei* 两个种高通量值出现在冬季风期间的缘故。

次表层种 *P. obliquiloculata* 高含量主要出现在热带海域的冬季样品中^[18-22],浅层、中层与深层捕获器中浮游有孔虫 *P. obliquiloculata* 通量变化范围分别为 2~272、0~110 和 2~370 枚·m⁻²·d⁻¹,平均通量分别为 43 枚·m⁻²·d⁻¹、27 枚·m⁻²·d⁻¹和 36 枚·m⁻²·d⁻¹,冬季风期间(11 月至翌年 3 月)三层月平均通量为 61 枚·m⁻²·d⁻¹,夏季风期间(7、8 月)三层月平均通量为 4 枚·m⁻²·d⁻¹,季风间期(其余月份)三层月平均通量为 11 枚·m⁻²·d⁻¹。浅、中、深层捕获器中 *P. obliquiloculata* 占浮游有孔虫群的年平均含量分别为 8.7%、9.9%和 11.6%,总体上看在冬季风强盛期通量和百分含量出现高值,在夏季风与季风间期较低(图 2、3)。*N. dutertrei* 在海水叶绿素 a 高值区或海岸附近海域区丰度高,其高丰度与较高生产力的环境有关^[7,23],在研究区浅层、中层与深层捕获器中浮游有孔虫 *N. dutertrei* 通量变化范围分别为 0~191、0~

90 和 0~55 枚·m⁻²·d⁻¹,平均通量分别为 34 枚·m⁻²·d⁻¹、18 枚·m⁻²·d⁻¹和 17 枚·m⁻²·d⁻¹,冬季风期间(11 月至翌年 3 月)三层月平均通量为 36 枚·m⁻²·d⁻¹,夏季风期间(7、8 月)三层月平均通量为 8 枚·m⁻²·d⁻¹,季风间期(其余月份)三层月平均通量为 11 枚·m⁻²·d⁻¹。浅、中、深层捕获器中占浮游有孔虫群的年平均含量分别为 7.2%、5.6%和 8.8%,总体上看在冬季风强盛期通量和百分含量出现高值,在夏季风与季风间期较低(图 2、3),其高通量与东亚冬季风作用下深层水上翻携带的富营养物质有关。因此,在冬季风期间 *P. obliquiloculata* 和 *N. dutertrei* 的通量和相对丰度均相对较高。

本次研究所得样品较少,因此,相对丰度较低的广适应性种 *G. glutinata*、上升流指示种 *G. bulloides*、深水种 *G. menardii* 与 *G. scitula* 仅在个别样品中出现,通量很低,在此看不出统计意义和规律性。

将浅层、中层和深层捕获器中浮游有孔虫总通量同颗粒总通量、有机碳、总碳、总氮、碳酸钙和蛋白石通量的变化规律进行比较(图 4),发现其季节变化比较一致,呈现出季风期通量高、季风间期通量低的“双峰态”模式,特别是冬季风期间高通量特点异常明显。

将表层捕获器中浮游有孔虫主要属种 *G. ruber*, *G. sacculifer*, *P. obliquiloculata*, *N. dutertrei* 通量和 TPF、TCF、TNF、CaCO₃F、OpF 和 OCF 做主成分分析(PCA),从第一主成分曲线上可以看出这种“双峰态”模式,其中冬季的峰值比较显著。并将第一主成分与表层海水温度(SST)、海表风速和叶绿素 a 浓度进行距平标准化后对比(图 5),发现第一主成分与叶绿素 a 浓度变化一致,叶绿素 a 浓度较大的 12 月份第一主成分也达到最大值。在风速较大的 7、8 月份和 12 月份,叶绿素 a 浓度和第一主成分也较大,并且从 11、12 月份可以看出,风速最大值的出现早于叶绿素 a 浓度最大值的出现大概 15 天,这可能是由于风速加大引起下层海水中营养物质的上翻,从而引起叶绿素 a 浓度的加大和第一主成分的变大,这种相位差在夏季风速与叶绿素 a 浓度之间并不明显而在风速与第一主成分之间仅略有体现(图 5),说明该南海北部的沉积物捕获器站位主要受东亚冬季风的控制,东亚夏季风对该区的控制作用较弱。表层海水温度与第一主成分和叶绿素 a 浓度存在比较显著的延迟负相关(图 5,表 4),表层海水温度最低值的出现迟于第一主成分和叶绿素 a 浓度最大值出现约一个月时间,这可能是由于东亚冬季风最强盛期出现在早冬时节的缘故。

表1 南海北部浅层1003 m 捕获器中2009年6月至2010年5月各类颗粒通量与浮游有孔虫总通量和7个主要种的通量统计

Table 1 Seasonal flux data of total particle (TPF) , total carbon (TCF) , total nitrogen (TNF) , CaCO₃ (CaCO₃F) , opal (OpF) , organic carbon (OCF) , total planktonic foraminifera(TFFs) and 7 major species at the shallow sediment trap from June 2009 to May 2010

日期	颗粒通量(mg • m ⁻² • d ⁻¹)							浮游有孔虫通量(枚 • m ⁻² • d ⁻¹)						
	TPF	TCF	TNF	CaCO ₃ F	OpF	OCF	TFFs	G. rub.	G. sac.	P. obl.	N. dut.	G. glu.	G. bu	
-06-27—2009-07-13	73.44	7.84	0.54	32.12	18.12	3.98	142	6	64	2	8	0	0	
-07-13—2009-07-29	82.52	8.42	0.59	34.16	25.02	4.32	116	22	78	2	4	0	0	
-07-29—2009-08-14	90.87	9.07	0.62	39.75	20.97	4.30	135	40	79	2	0	2	0	
-08-14—2009-08-30	97.22	11.34	0.65	55.73	20.15	4.65	711	162	391	22	51	0	0	
-08-30—2009-09-15	45.37	5.35	0.43	20.70	13.06	2.87	-	-	-	-	-	-	-	
-09-15—2009-10-01	56.86	6.03	0.42	25.53	14.00	2.96	126	10	101	5	0	0	0	
-10-01—2009-11-17	75.55	8.46	0.37	49.91	11.79	2.47	221	64	116	18	13	0	0	
-10-17—2009-10-02	102.88	11.01	0.63	55.16	18.14	4.39	193	86	59	17	20	7	0	
-11-02—2009-11-18	202.30	18.50	1.37	73.86	48.43	9.63	673	112	200	129	149	7	0	
-11-18—2009-12-04	280.64	21.42	2.02	74.46	58.36	12.48	621	302	201	38	13	0	0	
-12-04—2009-12-20	294.74	27.14	1.69	128.18	90.89	11.76	1 526	436	454	272	191	100	0	
-12-20—2010-01-05	181.86	14.17	0.92	63.54	46.80	6.55	439	217	81	14	27	60	0	
-01-05—2010-01-21	56.90	5.32	0.38	23.76	14.02	2.47	-	-	-	-	-	-	-	
-01-21—2010-02-06	149.45	16.25	0.72	96.33	31.16	4.69	425	14	150	143	43	2	5	
-02-06—2010-02-22	146.32	13.32	0.81	63.39	48.13	5.72	121	2	64	5	7	2	0	
-02-22—2010-03-10	114.81	11.13	0.80	48.73	30.17	5.28	89	18	38	12	8	0	0	
-03-10—2010-03-26	50.12	4.55	0.35	18.34	8.92	2.35	-	-	-	-	-	-	-	
-03-26—2010-04-11	271.24	17.69	1.38	70.66	65.03	9.21	217	14	118	33	14	0	0	
-04-11—2010-04-27	180.30	13.71	0.99	57.27	48.93	6.84	159	40	56	5	15	0	25	
-04-27—2010-05-13	162.07	14.75	0.97	67.92	36.21	6.60	244	30	87	10	12	5	0	

. glu. , G. bul. , N. dut. , P. obl. , G. sac. 和 G. rub. 分别为 G. menardii , G. glutinata , G. bulloides , N. dutertrei , P. obliquiloculata , G. sacculifer 和 G. ruber 的缩写

表 2 南海北部中层 2 188 m 捕获器中 2009 年 6 月至 2010 年 5 月各类颗粒通量与浮游有孔虫总通量和 7 个主要种的通量统计

Table 2 Seasonal flux data of total particle (TPF), total carbon (TCF), total nitrogen (TNF), CaCO₃ (CaCO₃F), opal (OpF), organic carbon (OCF), total planktonic foraminifera (TFFs) and 7 major species at the middle sediment trap from June 2009 to May 2010

日期	颗粒通量(mg • m ⁻² • d ⁻¹)							浮游有孔虫通量(枚 • m ⁻² • d ⁻¹)						
	TPF	TCF	TNF	CaCO ₃ F	OpF	OCF	TFFs	G. rub.	G. sac.	P. obl.	N. dut.	G. glu.	G. bul.	G. men.
2009-06-27—2009-07-13	88.89	7.64	0.34	31.16	25.08	3.90	55	12	36	0	0	0	0	2
2009-07-13—2009-07-29	89.99	7.87	0.36	32.16	25.34	4.01	113	31	36	4	4	0	0	4
2009-07-29—2009-08-14	99.05	8.53	0.37	36.25	29.73	4.18	165	77	66	4	4	0	0	0
2009-08-14—2009-08-30	111.54	10.71	0.29	57.14	26.77	3.85	268	74	155	4	9	2	2	2
2009-08-30—2009-09-15	81.51	6.92	0.32	26.95	26.38	3.69	156	34	89	3	3	0	0	12
2009-09-15—2009-10-01	75.95	7.11	0.23	35.33	17.95	2.87	24	5	14	0	0	0	0	0
2009-10-01—2009-11-17	85.06	8.23	0.18	46.32	18.83	2.67	127	23	75	7	5	0	0	0
2009-10-17—2009-10-02	29.37	2.91	0.13	13.84	5.61	1.25	-	-	-	-	-	-	-	-
2009-11-02—2009-11-18	196.24	17.04	0.60	80.33	49.66	7.40	527	73	163	100	90	3	0	3
2009-11-18—2009-12-04	200.09	14.93	0.60	64.84	48.92	7.15	494	72	187	72	75	0	0	6
2009-12-04—2009-12-20	297.63	24.39	1.44	113.50	64.49	10.77	539	119	196	110	69	0	0	5
2009-12-20—2010-01-05	245.66	17.24	1.13	73.51	62.96	8.41	201	21	75	38	33	4	0	0
2010-01-05—2010-01-21	157.98	11.34	0.74	49.68	44.44	5.38	55	10	31	12	0	0	0	0
2010-01-21—2010-02-06	200.77	16.40	0.92	81.38	52.59	6.63	157	14	85	38	0	0	0	0
2010-02-06—2010-02-22	187.96	14.07	0.94	60.33	59.68	6.83	398	110	103	37	6	6	6	24
2010-02-22—2010-03-10	191.78	13.08	0.83	60.62	51.18	5.81	296	175	70	16	11	0	16	5
2010-03-10—2010-03-26	159.04	11.06	0.75	47.62	45.10	5.34	34	2	20	2	5	0	0	0
2010-03-26—2010-04-11	227.75	14.20	0.97	60.55	54.89	6.94	295	45	141	45	32	10	6	0
2010-04-11—2010-04-27	152.52	9.41	0.63	40.64	34.52	4.53	40	20	15	4	0	0	0	0
2010-04-27—2010-05-13	94.21	6.98	0.43	32.49	19.38	3.08	170	12	105	12	0	0	0	0

注: G. men. , G. glu. , G. bul. , N. dut. , P. obl. , G. sac. 和 G. rub. 分别为 G. menardii , G. glutinata , G. bulloides , N. dutertrei , P. obliquiloculata , G. sacculifer 和 G. ruber 的缩写

表3 南海北部深层3 226 m 捕获器中2009年6月至2010年5月各类颗粒通量与浮游有孔虫总通量和7个主要种的通量统计

Table 3 Seasonal flux data of total particle (TPF) , total carbon (TCF) , total nitrogen (TNF) , CaCO₃(CaCO₃F) , opal (OpF) , organic carbon (OCF) , total planktonic foraminifera (TFFs) and 7 major species at the deep sediment trap from June 2009 to May 2010

日期	颗粒通量(mg · m ⁻² · d ⁻¹)							浮游有孔虫通量(枚 · m ⁻² · d ⁻¹)						
	TPF	TCF	TNF	CaCO ₃ F	OpF	OCF	TFFs	G. rub.	G. sac.	P. obl.	N. dut.	G. glu.	G. bul.	G. men.
2009-06-27—2009-07-13	3.70	0.39	0.00	2.76	0.18	0.06	49	7	29	2	3	0	0	0
2009-07-13—2009-07-29	97.60	7.41	0.34	34.17	25.60	3.31	147	58	54	2	6	0	4	0
2009-07-29—2009-08-14	90.24	6.50	0.26	29.35	26.49	2.98	-	-	-	-	-	-	-	-
2009-08-14—2009-08-30	90.68	6.91	0.30	32.04	23.51	3.06	107	27	67	8	2	0	0	0
2009-08-30—2009-09-15	95.04	8.20	0.29	41.61	20.19	3.20	229	34	132	3	16	0	0	0
2009-09-15—2009-10-01	89.10	7.36	0.28	34.32	21.31	3.25	82	12	47	2	0	0	0	9
2009-10-01—2009-11-17	76.42	6.24	0.24	29.16	20.92	2.74	-	-	-	-	-	-	-	-
2009-10-17—2009-11-02	87.40	7.28	0.23	36.89	19.50	2.86	257	45	156	12	28	0	3	0
2009-11-02—2009-11-18	87.85	7.50	0.18	40.98	21.7	82.59	325	45	160	58	31	0	0	0
2009-11-18—2009-12-04	121.18	9.06	0.34	41.41	27.93	4.09	208	30	86	52	28	0	0	0
2009-12-04—2009-12-20	158.18	11.92	0.47	51.43	37.78	5.75	65	26	26	9	4	0	0	0
2009-12-20—2010-01-05	218.05	16.55	0.47	82.36	52.26	6.67	553	90	306	68	51	0	0	4
2010-01-05—2010-01-21	183.17	12.61	0.46	55.35	47.14	5.97	147	30	25	11	55	0	0	0
2010-01-21—2010-02-06	190.05	12.76	0.43	57.41	46.74	5.87	98	9	52	20	11	0	0	0
2010-02-06—2010-02-22	197.09	14.90	0.45	71.24	54.68	6.36	802	22	317	370	40	12	6	12
2010-02-22—2010-03-10	179.77	13.00	0.49	54.06	47.67	6.51	69	7	33	3	0	0	0	7
2010-03-10—2010-03-26	175.35	11.94	0.38	52.83	45.87	5.60	60	14	24	10	0	0	5	2
2010-03-26—2010-04-11	149.02	9.73	0.34	38.97	42.20	5.06	20	2	7	2	2	0	0	0
2010-04-11—2010-04-27	151.13	10.54	0.36	46.97	37.68	4.90	129	50	33	10	5	5	5	0
2010-04-27—2010-05-13	102.97	6.91	0.24	28.59	23.18	3.48	98	27	48	5	19	0	0	0

注: G. men. , G. glu. , G. bul. , N. dut. , P. obl. , G. sac. 和 G. rub. 分别为 G. menardii , G. glutinata , G. bulloides , N. dutertrei , P. obliquiloculata , G. sacculifer 和 G. ruber 的缩写

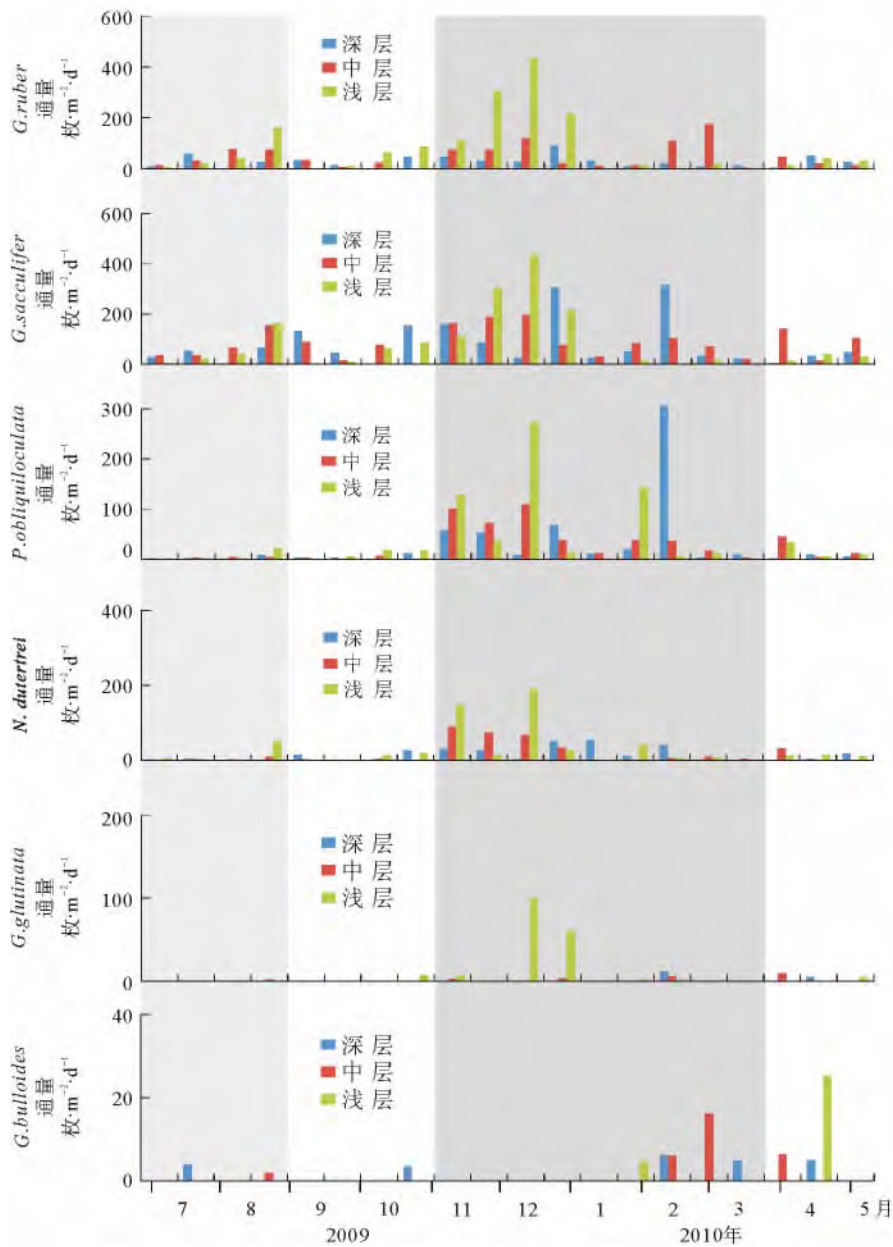


图 2 2009 年 6 月至 2010 年 5 月南海北部浅、中、深层捕获器中主要浮游有孔虫属种通量的季节变化
 Fig. 2 Seasonal variation in shell flux of the major six planktonic foraminiferal species from June 2009 to May 2010 at the shallow (light blue), middle (red) and deep (green) traps

2.2 浮游有孔虫壳体稳定氧同位素

从图 6、7 可以看出,南海北部 SCS-N-03 站浅、中、深 3 层沉积物捕获器样品中浮游有孔虫 *G. ruber*, *G. sacculifer* 的氧碳稳定同位素值大体一致,无分层现象,说明有孔虫壳体在下沉过程中,碳酸盐溶解作用对壳体氧碳稳定同位素影响较弱。*G. ruber*, *G. sacculifer* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 $-3.48\text{‰} \sim -2.13\text{‰}$ 、 $-3.24\text{‰} \sim -2.01\text{‰}$ 之间变化,年平均值分别为 -2.94‰ 、 -2.51‰ ,图 5 中 $\delta^{18}\text{O}$ 值的变化趋势和年均值均表现出 *G. ruber* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值比 *G. sacculifer*

的 $\delta^{18}\text{O}$ 值轻。冰盖效应、温度和盐度是影响浮游有孔虫壳体稳定氧同位素的 3 个主要因子,由于同一捕获器中 *G. ruber*, *G. sacculifer* 来自同一时间段和同一海域的表层海水,因此,温度是其主要控制因素,在此不考虑冰盖和盐度,海水 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化 0.26‰ 相当于 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的海水温度变化^[24], *G. ruber* 的年均 $\delta^{18}\text{O}$ 值比 *G. sacculifer* 的年均 $\delta^{18}\text{O}$ 值低 0.43‰ ,由此可得出 *G. ruber* 生活水层的年均海水温度比 *G. sacculifer* 生活水层的年均海水温度低 $1.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,这一结果与万随等在南沙海区沉积物捕获器中浮游有孔虫 *G. ruber*, *G. sacculifer* 得出的 $\delta^{18}\text{O}$

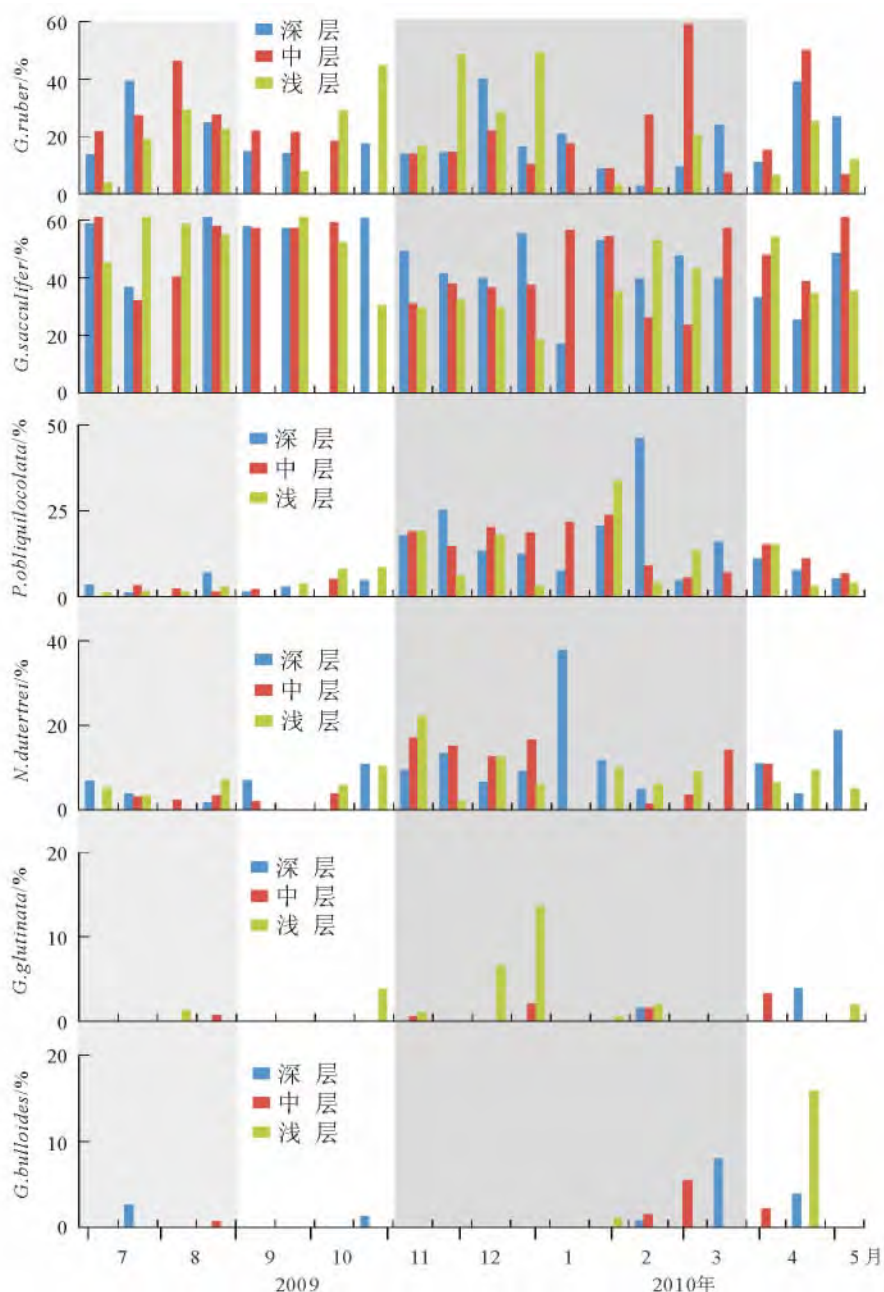


图3 2009年6月至2010年5月南海北部浅、中、深层捕获器中主要浮游有孔虫属种相对丰度的季节变化
Fig. 3 Seasonal variation in relative abundance (%) of the major six planktonic foraminiferal species from June 2009 to May 2010 at the shallow (light blue), middle (red) and deep (green) traps

差值 0.50% 有 0.07% 的偏差^[5], 与成鑫荣等^[4] 利用南海中部 1993—1995 年沉积物捕获器中浮游有孔虫 *G. ruber*、*G. sacculifer* 得出的 0.52% 相当于 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水温梯度也不完全吻合, 可能是因为本次研究所用 *G. ruber* 样品部分缺失, 影响了 *G. ruber* 平均值的精确性, 但 *G. ruber* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值比 *G. sacculifer* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值偏轻, 生活水层水温较高这一现象明显。

G. ruber、*G. sacculifer* 和海水表层温度 (SST) 呈现明显的季节变化, 东季风盛行期间 (11—2 月) 有孔虫壳体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值重, 海水温度较低; 夏季风盛

行期间 (6—8 月) 有孔虫壳体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值轻, 海水温度较高 (图 6)。将 *G. ruber*、*G. sacculifer* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 与该海区 SST 进行相关分析, 发现浅层捕获器中 *G. sacculifer* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 SST 之间的变化趋势相反, 且具有较好的负相关关系, Spearman 相关系数达到了 -0.641 , 单尾检验显著水平 $P=0.001$, 通过了 0.01 显著水平检验 (表 4)。

2.3 浮游有孔虫壳体稳定碳同位素

G. ruber、*G. sacculifer* 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化较为复

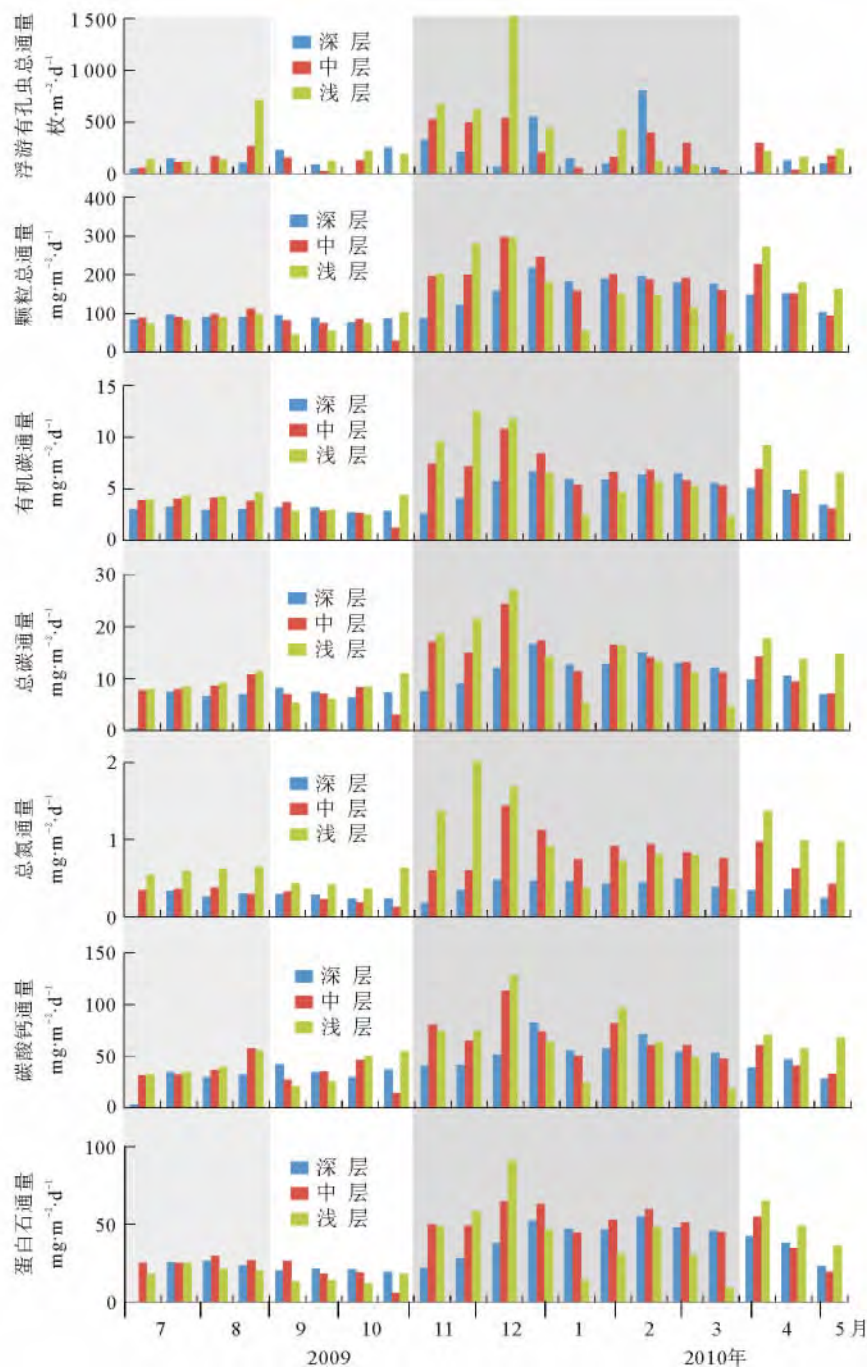


图 4 2009 年 6 月至 2010 年 5 月南海北部浅、中、深层捕获器中浮游有孔虫总通量与总颗粒、有机碳、总碳、总氮、碳酸钙、蛋白石通量季节变化的比较

Fig. 4 Comparison of the seasonal variations in planktonic foraminiferal shell flux (TFFS), total particle Flux (TPF), organic carbon flux (OCF), total carbon flux (TCF), total nitrogen (TNF), CaCO₃ flux (CaCO₃F) and opal Flux (OpF) from June 2009 to May 2010 at the shallow (light blue), middle (red) and deep (green) traps

杂,虽季节性变化不如 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化明显,总的来说也具有一定的季节性变化。与南海南部 $\delta^{13}\text{C}$ 季风间歇期高,季风期间低不同,南海北部 SCS-N-03 站浮游有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 值冬季高、夏季低(图 7)。从图 7 看出,*G. ruber*、*G. sacculifer* 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 -0.186‰ $\sim -0.713\text{‰}$, $-0.169\text{‰} \sim 1.061\text{‰}$ 之间变化,年平均

值分别为 0.273‰ 、 0.520‰ 。图 7 中 $\delta^{13}\text{C}$ 值的变化趋势和年均值均表现出 *G. ruber* 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值比 *G. sacculifer* 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值小。反映初级生产力的叶绿素 a 含量的最大值并不在最表层,从表层至水深 50 m 左右,叶绿素 a 的含量随水深逐渐变大,50~100 m 处达到最大值,再往深处又逐渐减小。表层至水

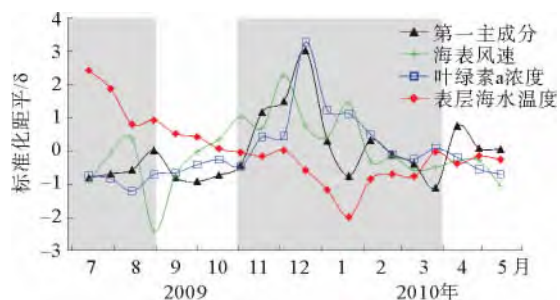


图5 2009年6月至2010年5月南海北部浅层捕获器中各类颗粒和主要属种通量第一主成分与海表风速及叶绿素a浓度与表层海水温度的比较

Fig. 5 Comparison between the seasonal variations in the first principal component (black), wind speed (light blue), Chlorophyll-a concentration (green) and surface water temperature (red) from June 2009 to May 2010

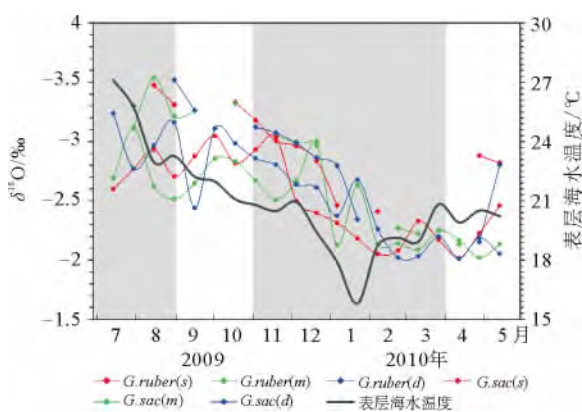


图6 南海北部浮游有孔虫 *G. ruber*、*G. sacculifer* 的氧稳定同位素与表层海水温度的季节变化

Fig. 6 Seasonal variations in planktonic foraminiferal $\delta^{18}\text{O}$ of *G. ruber* and *G. sacculifer* and sea surface temperature (black) from June 2009 to May 2010 at sediment trap SCS-N-03

深 50 m 左右,初级生产力随水深加大逐渐上升,营养物质和 ^{12}C 消耗量随水深加大,消耗的 ^{12}C 又不能及时得到大气中 ^{12}C 的补充,造成生活在较深水层 *G. sacculifer* 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值比较浅水层 *G. ruber* 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值大的结果^[25]。因此,浮游有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以反映海水营养及生产力状况。

将 *G. ruber*、*G. sacculifer* 两个种的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与该海域海水表面风速对比,结果呈现出相反的变化趋势(图7),季风盛行期间(11—2月,6—8月)海表风速较大,浮游有孔虫壳体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较小;季风间歇期间(9—10月,3—5月)海表风速较小,浮游有孔虫壳体的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较大(图7)。将浅层捕获器中 *G. sacculifer* 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与该海区的海表风速进行相关分析,发现 *G. sacculifer* 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与海表风速之间的变化趋势相反,且具有较好的负相关关系,

Spearman 相关系数为-0.463,单尾检验显著水平 $P=0.02$,通过了 0.05 显著水平检验(表4)。这是因为海水表面风速加大,增强了表层海水的垂直混合作用,较深层水被带到表层,由于有机物质在下沉过程中的溶解作用,较深层水中富含 ^{12}C ,提高了季风期浮游有孔虫环境海水的 ^{12}C 值,因此,季风期浮游有孔虫的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低。表明在季节尺度上,浮游有孔虫表层种 $\delta^{13}\text{C}$ 值受海水表面风速控制。与此同时,较深层水中富含 N、P、Si 等营养元素,表层风速的增大将深层富含营养元素的海水带到表层,提高了表层海水中浮游植物的初级生产力,因此,浮游有孔虫的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与表层海水的叶绿素a浓度呈负相关(图8)。将浅层捕获器中 *G. sacculifer* 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与该海区的叶绿素a浓度进行相关分析,发现 *G. sacculifer* 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值与叶绿素a浓度之间的变化趋势相反,且具有较好的负相关, Spearman 相关系数为-0.693,单尾检验显著水平 $P=0$,通过了 0.05 显著水平检验(表4)。

3 结论

(1)季风控制海表真光层的初级生产力,季风期间海表风速增加、叶绿素a浓度升高。浮游有孔虫总通量和主要属种通量存在明显的季节变化,并与颗粒总通量(TFFs)、有机碳通量(OCF)、总碳通量(TCF)、总氮通量(TNF)、碳酸钙通量(CaCO_3F)和蛋白石通量(OpF)变化趋势一致。在东北季风(11月至翌年3月)和西南季风(6—9月)盛行期出现高值,在季风转型期4、5、10月出现低值,呈现典型的“双峰态”通量模式。揭示了浮游有孔虫季节变化受季风控制下的初级生产力的影响。

(2)浮游有孔虫壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 值存在明显的季节性变化。冬季风盛行期 $\delta^{18}\text{O}$ 值重,海水温度相对较低;夏季风盛行期 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对偏轻,海水温度相对较高。

(3)浮游有孔虫壳体 $\delta^{13}\text{C}$ 值在东亚季风盛行期低,在季风间歇期高,与叶绿素a浓度和海表面风速的变化趋势相反。这是因为海表风速加大将深层富含 ^{12}C 和 N、P、Si 的海水带到表层,使得浮游有孔虫 $\delta^{13}\text{C}$ 值较低而表层海水叶绿素a浓度升高。

致谢:研究所用样品由中德合作“南方涛动(ENSO)-季风系统对南海北部生物地球化学通量的影响”项目,2009年6月到2010年5月期间沉积物捕获器提供。张静静为实验提供了便利,赵泉鸿、范维佳对本文提出了修改意见,在此一并表示感谢。

表 4 南海北部浅层捕获器中 *G. sacculifer* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值与海表水温和海表风速及叶绿素 a 浓度的相关性
 Table 4 The correlation among sea surface temperature (SST), wind speed, chlorophyll-a concentration (Chla), $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ of *G. sacculifer* shallow sediment trap

	<i>G. sac</i> ($\delta^{18}\text{O}$)	<i>G. sac</i> ($\delta^{13}\text{C}$)	SST	海表风速	叶绿素 a 浓度
<i>G. sac</i> ($\delta^{18}\text{O}$)		-0.293	-0.641	-0.187	0.482
<i>G. sac</i> ($\delta^{13}\text{C}$)	(0.105)		0.439	-0.463	-0.693
SST	(0.001)	(0.026)		-0.265	-0.779
海表风速	(0.216)	(0.020)	(0.130)		0.502
叶绿素 a 浓度	(0.016)	(0.000)	(0.000)	(0.012)	

注:表中数据-0.293 表示各变量间的 spearman 相关系数;(0.105)表示各变量间的单尾显著性水平。

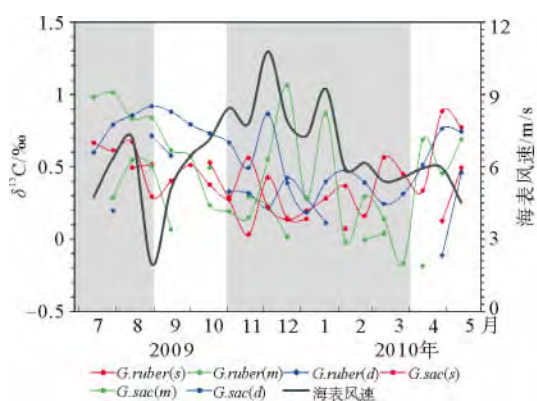


图 7 南海北部浮游有孔虫 *G. ruber*、*G. sacculifer* 的碳稳定同位素与海表风速的季节变化

Fig. 7 Seasonal variations in planktonic foraminiferal $\delta^{13}\text{C}$ of *G. ruber* and *G. sacculifer* and surface wind speed (black) from June 2009 to May 2010 at sediment trap SCS-N-03

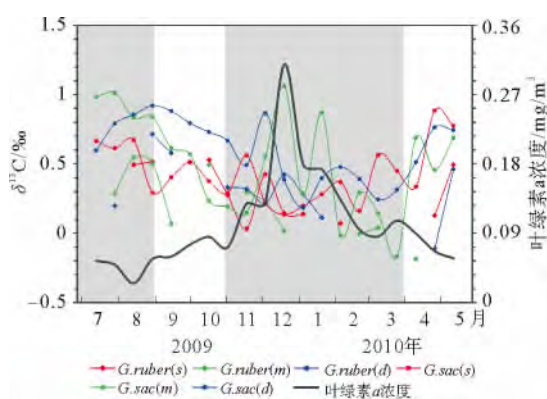


图 8 南海北部浮游有孔虫 *G. ruber*、*G. sacculifer* 的碳稳定同位素与叶绿素 a 浓度的季节变化

Fig. 8 Seasonal variations in planktonic foraminiferal $\delta^{13}\text{C}$ of *G. ruber*, *G. sacculifer* and chlorophyll-a concentration (black) from June 2009 to May 2010 at sediment trap SCS-N-3

参考文献 (References)

[1] 陈荣华, 郑玉龙, Wiesner M G, 等. 1993—1996 年南海中部海

洋沉降颗粒通量的季节和年际变化[J]. 海洋学报, 2006, 28 (3): 72-80. [CHEN Ronghua, ZHENG Yulong, Wiesner M G, et al. Seasonal and annual variations of marine sinking particulate flux during 1993—1996 in the central South China Sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 28(3): 72-80.]

[2] 陈荣华, 翦知湑, 郑玉龙, 等. 南海中部浮游有孔虫通量的季节变化[J]. 同济大学学报, 2000, 28(1): 73-77. [CHEN Ronghua, JIAN Zhimin, ZHENG Yulong, et al. Seasonal variations of Planktonic Foraminifera flux in the central South China Sea[J]. Journal of Tongji University, 2000, 28(1): 73-77.]

[3] 林洪瑛, 程赛伟, 韩舞鹰, 等. 南沙群岛海域夏季沉降颗粒的垂直通量[J]. 海洋通报, 2001, 20(3): 36-39. [LIN Hongying, CHENG Saiwei, HAN Wuying, et al. Vertical Flux of the Settling Particulate Matter in the Waters of the Nansha Islands in Summer[J]. Marine Science Bulletin, 2001, 20(3): 36-39.]

[4] 成鑫荣, 陈荣华, 翦知湑, 等. 南海中部沉积物捕集器中浮游有孔虫的稳定同位素分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(4): 73-78. [CHENG Xinrong, CHEN Ronghua, JIAN Zhimin, et al. Preliminary report on the stable isotopic change of planktonic foraminifers from the sediment traps in the central south china sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2002, 22(4): 73-78.]

[5] 万随, 翦知湑, 成鑫荣, 等. 南海海区浮游有孔虫通量及其壳体化学性质的季节变化[J]. 中国科学, 2010, 40(7): 881-892. [WAN Sui, JIAN Zhimin, CHENG Xinrong, et al. Seasonal variations in planktonic foraminiferal flux and the chemical properties of their shells in the southern South China Sea [J]. Sci China Earth Sci, 2010, doi:10.1007/s11430-010-4039-3.]

[6] Lin H L. Stable isotopes in modern planktonic foraminifera: Sediment trap and plankton tow results from the South China Sea [J]. Mar Micropaleontol, 2011, 79: 15-23.

[7] Lin H L, Hsieh H Y. Seasonal variations of modern planktonic foraminifera in the South China Sea [J]. Deep-Sea Res II, 2007, 54: 1634-1644.

[8] 郑玉龙, 王汝建, 郑连福, 等. 南海北部 1987—1988 年颗粒物质和硅藻通量的季节性变化: 季风气候与 EI Nino 的响应[J]. 第四纪研究, 2001, 4: 359-365. [ZHENG Yulong, WANG

- Rujian, ZHENG Lianfu, et al. Seasonal variations of particulate matter and diatom fluxes in the northern south china sea during 1987—1988; Monsoon climate and El Niño Responses [J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 4: 359-365.]
- [9] 王汝建, 林隽, 郑连福, 等. 1993—1995年南海中部的硅质生物通量及其季节性变化: 季风气候和 El Niño 的响应[J]. *科学通报*, 2000, 45(9): 974-978. [WANG Rujian, LIN Juan, ZHENG Lianfu, et al. Seasonal variations of Siliceous plankton fluxes in central south china sea during 1993—1995; Monsoon climate and El Niño Responses[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(9): 974-978.]
- [10] 冉莉华, 郑玉龙, 陈建芳, 等. 南海北部和中部硅藻通量季节性变化及其对季风气候的响应[J]. *海洋学报*, 2011, 33(5): 139-145. [RAN Lihua, ZHENG Yulong, CHEN Jianfang, et al. The influence of monsoon on seasonal changes of diatom fluxes in the northern and central South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2011, 33(5): 139-145.]
- [11] 陈建芳, 陈荣华, Wiesner M G, 等. 南海水柱微体生物壳体中氨基酸、氨基糖与糖类物质的检出及意义[J]. *海洋与湖沼*, 2000, 31(6): 596-603. [CHEN Jianfang, CHEN Ronghua, Wiesner M G, et al. Amino acids, amino sugars and carbohydrates in setting planktonic tests and their implications for the South China Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(6): 596-603.]
- [12] 陈建芳, 徐鲁强, 郑连福. 南海北部时间系列沉降颗粒的有机地球化学特征及意义[J]. *地球化学*, 1997, 26(6): 47-56. [CHEN Jianfang, XU Luqiang, ZHENG Lianfu, et al. Organic geochemical characteristics and implications of time-series setting particles from the northern South China Sea [J]. *Geochimica*, 1997, 26(6): 47-56.]
- [13] 陈建芳, 郑连福, Wiesner M G, 等. 基于沉积物捕获器的南海表层初级生产力及输出生产力估算[J]. *科学通报*, 1998, 43(6): 639-642. [CHEN Jianfang, ZHENG Lianfu, Wiesner M G, et al. Estimation of South China Sea surface primary productivity and output productivity with sediment trap samples[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(6): 639-642.]
- [14] 陈建芳, 郑连福, 陈荣华, 等. 南海颗粒物质的通量、组成及其与沉积物积累率的关系初探[J]. *沉积学报*, 1998, 16(3): 14-19. [CHEN Jianfang, ZHENG Lianfu, CHEN Ronghua, et al. Fluxes and constituents of particulate matter in the South China Sea in comparison with sediment accumulation rates [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(3): 14-19.]
- [15] 徐鲁强, 陈建芳, 郑连福. 南海北部沉降颗粒物中的糖类分布[J]. *海洋通报*, 1996, 15(4): 29-36. [XU Luqiang, CHEN Jianfang, ZHENG Lianfu. The distribution of setting particulate carbohydrates in the northern South China Sea [J]. *Marine Science Bulletin*, 1996, 15(4): 29-36.]
- [16] 徐鲁强, 陈建芳, 唐运千, 等. 南海北部沉降颗粒氨基酸通量及生物地球化学意义[J]. *海洋学报*, 1997, 19(2): 57-64. [XU Luqiang, CHEN Jianfang, TANG Yunqian, et al. Amino acids flux and biogeochemical implications of setting particles from the northern South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1997, 19(2): 57-64.]
- [17] 陈建芳, 郑连福. 沉积物捕获器与全球变化研究[J]. *海洋通报*. 1996, 15(1): 41-47. [CHEN Jianfang, ZHENG Lianfu. Sediment trap and global change study [J]. *Marine Science Bulletin*, 1996, 15(1): 41-47.]
- [18] B A W H. An ecological, zoogeographic, and taxonomic review of recent planktonic foraminifera// *Oceanic Micropaleontology*[M]. London: Academic Press, 1977: 1-100.
- [19] CHENG X R Huang B Q, JIAN Z M, et al. Foraminiferal isotopic evidence for monsoonal activity in the South China Sea: A present-LGM comparison[J]. *Mar Micropaleontol*, 2005, 54: 125-139.
- [20] Anand P, Elderfield H, Conte M H. Calibration of Mg/Ca thermometry in planktonic foraminifera from a sediment trap time series[J]. *Paleoceanography*, 2003, 18: 1050, doi: 10.1029/2002PA000846.
- [21] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R. et al. The NCEP/NCAR reanalysis 40-year project[J]. *Bull Amer Meteor Soc*. 1996, 77: 437-471.
- [22] Prell W L, Damuth J E. The climate-related diachronous disappearance of *Pulleniatina obliquiloculata* in late Quaternary sediments of the Atlantic and Caribbean[J]. *Mar Micropaleontol*, 1978, 3: 267-277.
- [23] Fairbanks R G, Sverdrup M, Free R. Vertical distribution and isotopic fractionation of living planktonic foraminifera from the Panama Basin[J]. *Nature*, 1982, 298: 841-844.
- [24] Moore T C J, Pisias N G, Dunn D A. Carbonate time series of the Quaternary and late Miocene sediments in the Quaternary and late Miocene sediments in the Pacific Ocean: A spectral comparison[J]. *Mar Geol*, 1982, 46: 217-233.
- [25] 中华人民共和国国家海洋局. 南海中部海域环境资源综合调查报告[C]. 北京: 海洋出版社, 1988. [State Oceanic Administration, PRC. Comprehensive Investigation Report on Environment & Resources in central South China Sea [C]. Beijing: China Ocean Press, 1988.]

THE INFLUENCE OF EAST ASIAN MONSOON ON SEASONAL VARIATIONS IN PLANKTONIC FORAMINIFERAL FLUX AND STABLE ISOTOPE IN THE NORTHERN SOUTH CHINA SEA DURING 2009—2010

WANG Xiaohua¹, CHEN Ronghua¹, ZHAO Qingying¹,
CHEN Jianfang¹, RAN Lihua^{1,2}, M. G. Wiesner²

(1 Second Institute of Oceanography, SOA, Hangzhou 310012, China;

2 Institute of Biogeochemistry and Marine Chemistry; University of Hamburg, Hamburg D-20146, Germany)

Abstract: Based on the analysis of the time-series samples obtained from the shallow, middle and deep sediment traps in the northern South China Sea from July 2009 to May 2010, it is found that the flux of the total planktonic foraminiferal tests (shells), and the flux and percentage of the primary species *Globigerinoides ruber*, *Globigerinoides sacculifer*, *Pulleniatina obliquiloculata* and *Neogloboquadrina dutertrei* are characterized by apparent seasonal variation. Their higher values appeared in the prevailing northeast and southwest East Asian Monsoon periods, especially in the winter monsoon time, and lower values appeared in intermittent period of the East Asian Monsoon, which performed a “bimodal pattern” flux model. Their seasonal variations are in line with the change in total particle flux, organic carbon flux, total nitrogen flux, calcium carbonate flux and opal fluxes, and all are closely related to the alteration of chlorophyll-a concentrations and wind speed, indicating that the biogenic particle flux in northern South China Sea is primarily controlled by the surface productivity affected by the monsoon. The seasonal $\delta^{18}\text{O}$ variation in planktonic foraminiferal tests is in conformity with the seasonal changes in sea temperature. The variations in species dwelled in different depth reflected the temperature gradient of the upper ocean. The $\delta^{13}\text{C}$ variations of planktonic foraminiferal tests generally performed lower values in the prevailing East Asian Monsoon periods and higher values in the monsoon intermittent time, showing an opposite variation trend with the chlorophyll-a concentrations and wind speed of the surface water. It demonstrates that the $\delta^{13}\text{C}$ value of the planktonic foraminiferal tests reflected the variation in nutrition or primary productivity of the ocean water.

Key words: sediment trap; planktonic foraminifera; oxygen/carbon isotope; East Asian Monsoon; northern South China Sea