中国科学: 地球科学 2010 年 第 40 卷 第 7 期: 881 ~ 892
www.scichina.com earth.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

论 文

南沙海区浮游有孔虫通量及其壳体化学性质的季节变化

万随*, 翦知湣, 成鑫荣, 乔培军, 王汝建

同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092
* E-mail: wansui1984@gmail.com

收稿日期: 2010-02-24; 接受日期: 2010-06-17
国家重点基础研究发展计划(编号: 2007CB815901)和国家自然科学基金项目(批准号: 40621063)资助

摘要 通过对南沙海区 2004~2006 年获得的浅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*, *Neogloboquadrina dutertrei*, *Globigerinita glutinata* 及 *Globigerina bulloides* 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, 在季风间歇期出现低值, 展示出典型的"双峰型"通量模式. *Pulleniatina obliquiloculata* 通量主要在东北季风期显示高值, 特殊地在 2004 年 8 月夏季风期间出现峰值. 浮游有孔虫通量与颗粒总通量、有机碳通量变化一致, 随叶绿素浓度和风速大小变化而改变, 表明南沙海区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、Mg/Ca 比值与表层海水温度的季节变化相吻合. 壳体δ^{18}O 主要受海水温度的变化的影响, 不同深度属种的δ^{18}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浓度的变化趋势相反, 说明浮游有孔虫δ^{13}C 值包含着水体营养和生产力的信息, 可能反映了海水表层生产力的变化.

关键词
沉积物捕获器
浮游有孔虫
氧、碳同位素
Mg/Ca 比值
季节变化
东亚季风
南沙海区

浮游有孔虫壳体记录着海水物理、化学及生物过程的相关信息, 反映了海洋温度、盐度、营养水平和生产力以及水体结构等环境变化[1~5]. 探讨现代浮游有孔虫生态性质和壳体记载的海洋水体的环境信息, 有助于重建古环境.

浮游有孔虫生态特征、壳体稳定同位素及 Mg/Ca 比值等化学性质在古环境研究中应用需要深入了解不同海域浮游有孔虫属种的通量以及钙化深度在时间序列(季节至年际尺度)上的变化特征. 沉积物捕获器样品分析可以提供颗粒通量及浮游有孔虫壳体化学性质在时间序列上的变化信息, 从而去研究现代浮游有孔虫生态及壳体化学性质和海洋环境的关系[6]. 太平洋[7~12]、大西洋[13,14]以及南大洋[15,16]沉积物捕获器样品显示出生源颗粒通量特征及浮游有孔虫标志属种壳体化学性质与相关水团性质、水文参数的季节性变化紧密相关. 孟加拉湾[17,18]和中国南海北部[19,20]及中部[21,22]等亚洲季风区边缘海布放的沉积物捕获器样品数据揭示了生源颗粒及浮游有孔虫

引用格式: Wan S, Jian Z M, Cheng X R, et al. Seasonal variations in planktonic foraminiferal flux and the chemical properties of their shells in the southern South China Sea. Sci China Earth Sci, 2010, doi: 10.1007/s11430-010-4039-3

“双峰型”的通量分布特点, 受区域海洋水文条件的控制. 不仅如此, 对南海北部和中部进一步研究发现, 浮游有孔虫壳体的同位素[19,20,22]以及 Mg/Ca 比值[23]也显示出明显的季节变化, 反映出受季风影响的海水环境参数的特征.

南海处在东亚季风区, 其表层环流明显受季风控制, 夏季和冬季的环流方向相反, 夏季盛行西南风, 表层环流为顺时针方向, 冬季风盛行东北风, 表层环流为逆时针方向. 西南季风通常出现在每年的 6 月至 9 月, 东北季风出现在 11 月至次年 3 月, 季风过渡期在 4, 5 月和 10 月[24]. 强烈的冬、夏季风会使表层海水强烈搅动, 产生上升流, 深层较为丰富的营养盐物质被带到表层, 可改变海洋表层生物生产力, 从而影响到海洋生源颗粒的时空分布. 南海南部的南沙海区不仅受季风的影响, 而且由于处在西太平洋暖池的北部边缘, 常年温度在 26℃以上, 属于贫营养海域, 同时受热带高温和缺乏营养的影响[24~26].

在南沙海区, 对颗粒通量变化以及浮游有孔虫生态与水文环境关系的时间序列变化的研究比较缺乏. 本次研究选择南沙海区沉积物捕获器于 2004 年 5 月 17 日至 2006 年 3 月 12 日所采集的样品进行浮游有孔虫通量和百分含量分析, 结合壳体稳定同位素和 Mg/Ca 比值分析, 并与颗粒总通量、有机碳通量以及现代海洋水文资料进行对比, 从而揭示浮游有孔虫生态及其壳体化学性质的变化与东亚季风和海洋水文条件之间的关系, 旨在为古海洋学研究提供可靠的替代性指标.

1 材料和方法

本次研究所用的样品来自 2004 年 5 月至 2006 年 3 月在南沙海区布放的浅层与深层捕获器(MaLANE Mark Ⅵ型), 浅层与深层样品均为 22 个. 每个样品的采样时间间隔均为 28 天. 而 2005 年 2 月 21 日至 2005 年 5 月 16 日期间, 由于电池动力不足, 转盘停止转动, 这段时间浅层与深层捕获器中颗粒沉积物各汇集到一个样品杯中. 沉积物捕获器布放前, 每个样品杯装满将要布放深度的海水, 并按 3.33 和 33.3 $g\cdot L^{-1}$ 加入 $HgCl_2$ 和 NaCl, 以阻止微生物生长、防止样品由于分解作用而改变以及减少样品因渗透作用而变质[6]. 然后将系统和锚系施放在(9°23′N, 113°14′E)位置, 浅层与深层沉积捕获器分别位于水深 720 与 2270 m, 具体位置见图 1. 回收捕获器时, 将样品放在约 4℃的冰箱中冷藏避光保存.

在实验室利用分样器将样品平均分成 10 份, 用 2~4 份样品作颗粒总通量、有机碳等分析. 过滤水样, 自然干后称重, 根据重量、时间及捕获面积计算而得颗粒总通量. 将用于分析颗粒总通量的样品用二次蒸馏水清洗, 然后在烘箱中烘干, 取 10 mg 左右样品在有机元素分析仪 EA1100 上测试, 可得出总碳的含量. 将剩余烘干的样品磨碎, 加入稀盐酸去除碳酸钙, 处理过后的样品再烘干, 用误差为百万分之一的天平称取 10 mg 左右的样品用锡箔包好, 在有机元素分析仪 EA1100 上测试出有机碳的含量. 总碳及有机碳测试在同济大学海洋地质国家重点实验室完成.

浮游有孔虫通量是根据采用“二分法”: 大于 154 μm 个体的统计数、所分析的样品份数、沉积物捕获器的已知面积和每个样品所持续的时间换算而得出的. 浮游有孔虫属种鉴定依据 Bé[27]的方法. 本研究浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber*, *Globigerinoides sacculifer*, *Pulleniatina obliquiloculata* 以及 *Neogloboquadrina dutertrei* 的氧、碳稳定同位素和 Mg/Ca 比值分析由同济大学海洋地质国家重点实验室完成. 所有样品均按照标准古生物学方法采集和处理. 从浮游有孔虫样品中挑选洁净无污染的, 壳径介于 300~360 μm 的 *G. ruber* 壳体 14 枚与 30 枚、360~440 μm 的 *G. sacculifer* 壳体 8 枚与 25 枚、360~440 μm

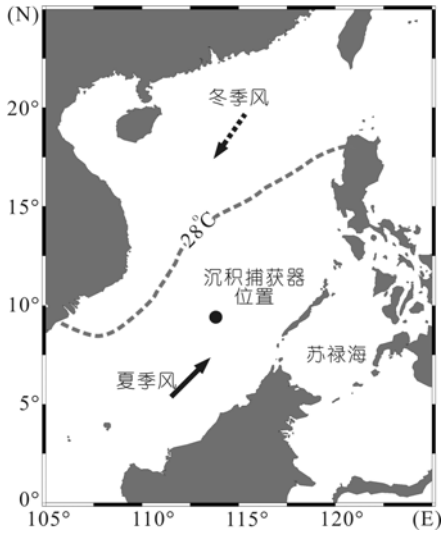

图 1 南海南部沉积物捕获器布放站位图

虚线是西太平洋暖池北界(28℃等温线)

的 *P. obliquiloculata* 壳体 8 枚与 20 枚、360~ 440 μm 的 *N. dutertrei* 壳体 10 枚与 25 枚, 分别进行稳定同位素与 Mg/Ca 比值测试. 利用碳酸盐制备装置(Kiel Ⅲ), 在 70℃的温度下经正磷酸溶解后放出 CO_2, 在稳定同位素比质谱仪(Finnigan MAT253)上分析其中的氧碳同位素[28]. $\delta^{18}O$ 与 $\delta^{13}C$ 标准偏差分别为 0.07‰及 0.05‰, 与国际 PDB 尺度的衔接是通过国际标样 NBS19 进行的. Mg/Ca 比值分析时考虑到现代样品中壳体中有机质含量偏高, 在氧化步骤提高氧化剂(H_2O_2)配比, 采用文献[23]样品清洗流程. 样品在 ICP-AES 上测试, Mg/Ca 比值的相对标准偏差为 0.432%. 对 *G. ruber*, *G. sacculifer*, *P. obliquiloculata* 和 *N. dutertrei* 的 Mg/Ca 比值, 分别采用文献[29]的经验公式来计算各自生活水层的海水温度. 由于部分捕获器样品所含浮游有孔虫壳体较少, 未能进行壳体 Mg/Ca 比值分析.

对南沙海区沉积物捕获器中浮游有孔虫数据分析时, 由于缺乏时间序列上的实测环境数据(如 CTD 所测温盐数据), 用于对比的表层海水温度(SST)及风速等现代水文数据资料来自 NOAA 时间序列数据库 NCEP/NCAR 再分析项目[30], 在时间域的分辨率可至月份平均, 空间域上纬度和经度范围分别为 10.5°~8.6°N 与 112.5°~114.4°E, 其中风速是根据纬向风与经向风的矢量和计算而得. 表层海水月均叶绿素浓度数据则来自基于遥感技术的 SeaWiFS 数据库, 对应的空间区域为 10°~9°N 与 113°~114°E. 用于对比的环境数据在时间分辨率和空间域上与真实的海水水文环境会有所差异, 但是基本可以反映海水环境时间序列上的变化趋势. 冬、夏季风及季风转换期的时间区间是根据以上季风的合成风速来判断, 即风速至低值可视为季风转换期的来临.

2 浮游有孔虫通量的季节变化

在南沙海区沉积物捕获器中, 共鉴定出 18 种浮游有孔虫, 其中含量在 10%以上的有 *G. ruber*, *G. sacculifer*, *N. dutertrei*, *Globigerinita glutinata* 和 *Globigerinella aequilateralis*, 在 3%~10%间的属种有 *P. obliquiloculata*, *Globigerina bulloides* 和 *Orbulina universa* 等. 浅层与深层捕获器中浮游有孔虫总通量变化范围分别为 86~2617 和 224~1813 枚·m^{-2}·d^{-1}(表 1, 2; 图 2), 其中浅层捕获器中浮游有孔虫总通量在 2004~2005 年和 2005~2006 年分别为 953 及 610 枚·m^{-2}·d^{-1}, 而所对应的深层捕获器中的通量值分别为 857 及 634 枚·m^{-2}·d^{-1}. 浅层(水深 720 m)和深层(水深 2270 m)捕获器中浮游有孔虫总通量大致相当, 说明南沙海区海水的横向运移作用对浮游有孔虫通量的影响较弱.

浮游有孔虫属种的通量和百分含量, 呈现出明显的季节变化, 且 2004~2005 年间的季节变化比 2005~2006 年的更为显著. 浅层和深层捕获器中浮游有孔虫主要属种几乎都在东亚冬季风和夏季风盛行时期出现通量和百分含量的高值, 展现出典型的“双峰”模式. 热带表层种 *G. ruber* 和 *G. sacculifer* 的百分含量几乎每月都很高, 两属种在浅层与深层捕获器中占浮游有孔虫群的年平均百分含量分别为 24%与 19%(图 3), 并且两者的通量在夏季风和冬季风强盛时都出现明显的高峰值(图 2). 次表层种 *P. obliquiloculata* 高含量常见于热带湾流, 主要出现在热带海域的冬季样品中[27,31], 在西太平洋常作为黑潮的标志种[32]. 在南沙海区浅层与深层捕获器中 *P. obliquiloculata* 占浮游有孔虫群的年平均含量约 3%, 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, 然而 2004 年 8 月份 *P. obliquiloculata* 也显示出异常高通量, 这可能与浮游有孔虫总通量在该月份相对较高有关, 由于观测数据的时间较短, *P. obliquiloculata* 通量的季节变化特征仍有待研究. *N. dutertrei* 在海水叶绿素高值区或海岸附近海域区丰度高, 与较高生产力的环境有关[33,34], 在研究区浅层与深层捕获器中占浮游有孔虫群的年平均含量约为 10%, 显示出典型的季风期通量高、季风间歇期通量低的双峰态. 广适应性种 *G. glutinata* 受上升流和温度条件的控制, 常富集在温跃层较深或海水生产力较高的环境中[35,36], 而 *G. bulloides* 喜生活在高营养盐和生产力的水体中, 常作为上升流的指标种[37,38], 它们在南沙海区都显示出典型的季风期通量高、季风间期通量低的双峰型. 深水种 *Globorotalia menardii* 与 *Globorotalia scitula* 在该站位捕获器样品中出现, 但是通量和百分含量很低, 这与南海南部浮游拖网的结果有所差异[39].

将浅层和深层捕获器中浮游有孔虫总通量和主要属种的通量与颗粒总通量和指示表层海水输出生产力的有机碳通量进行比较, 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

表 1　浅层 720 m 捕获器中颗粒总通量、有机碳通量与浮游有孔虫的通量 [a)]

日期	颗粒通量 ($mg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)		浮游有孔虫通量($枚 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)							
	TPF	OF	TFFs	*G. rub.*	*G. sac.*	*P. obl.*	*N. dut.*	*G. glu.*	*G. bul.*	*G. men.*
2004-05-17~06-14	63.4	4.6	318	22	140	0	9	7	0	2
2004-06-14~07-12	100.1	6.3	1598	453	53	11	124	356	57	13
2004-07-12~08-09	75.9	6.4	1070	406	114	15	145	158	44	2
2004-08-09~09-06	677.0	44.9	2617	553	128	137	233	1010	194	7
2004-09-06~10-04	371.7	18.2	389	82	29	15	42	42	23	5
2004-10-04~11-01	59.5	9.8	305	110	88	14	28	88	8	2
2004-11-01~11-29	42.4	2.5	499	166	180	4	24	19	2	13
2004-11-29~12-27	74.5	4.3	362	180	78	3	14	29	3	2
2004-12-27~2005-01-24	114.4	5.4	905	211	116	53	217	114	15	13
2005-01-24~02-21	97.5	5.4	990	219	128	42	160	213	53	4
2005-02-21~05-06	166.4	11.7	1429	320	431	14	93	109	42	9
2005-05-08~06-05	216.6	46.7	645	103	281	3	14	18	3	7
2005-06-05~07-03	119.9	7.4	648	157	222	0	50	57	7	7
2005-07-03~07-31	46.8	1.4	756	154	163	16	51	128	38	10
2005-07-31~08-28	132.1	5.8	926	286	162	19	133	91	65	6
2005-08-28~09-25	102.1	7.9	176	43	36	4	16	19	7	5
2005-09-25~10-23	238.3	11.0	566	114	170	10	40	50	26	14
2005-10-23~11-20	187.2	7.5	265	49	93	5	10	19	10	18
2005-11-20~12-18	38.5	0.0	86	21	36	1	3	5	2	4
2005-12-18~2006-01-15	248.4	9.1	1147	213	235	75	224	110	119	27
2006-01-15~02-12	240.6	13.4	730	114	143	19	78	82	97	4
2006-02-12~03-12	166.9	0.0	769	146	202	67	87	50	30	14

a) *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; TPF, OF 及 TFFs 分别代表颗粒总通量、有机碳通量及浮游有孔虫总通量, 下同

表 2　深层 2270 m 捕获器中颗粒总通量、有机碳通量与浮游有孔虫的通量

日期	颗粒通量($mg \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)		浮游有孔虫通量($枚 \cdot m^{-2} \cdot d^{-1}$)							
	TPF	OF	TFFs	*G. rub.*	*G. sac.*	*P. obl.*	*N. dut.*	*G. glu.*	*G. bul.*	*G. men.*
2004-05-17~06-14	101.4	4.7	431	119	130	2	20	20	0	3
2004-06-14~07-12	98.9	8.8	792	306	76	16	76	80	4	5
2004-07-12~08-09	124.3	4.5	655	242	96	11	129	44	15	2
2004-08-09~09-06	229.5	8.1	2304	338	135	71	194	875	158	9
2004-09-06~10-04	469.2	20.3	478	64	26	28	51	116	36	8
2004-10-04~11-01	148.9	5.8	423	127	82	10	24	64	18	7
2004-11-01~11-29	110.4	4.0	900	287	168	18	38	183	13	11
2004-11-29~12-27	96.6	3.3	411	141	105	4	18	25	2	11
2004-12-27~2005-01-24	136.8	5.1	1314	418	184	44	214	145	47	11
2005-01-24~02-21	206.2	7.7	1491	356	153	77	190	410	116	6
2005-02-21~05-06	68.9	2.4	224	48	57	2	17	27	3	3
2005-05-08~06-05	124.8	5.1	774	221	236	9	13	41	0	3
2005-06-05~07-03	119.0	4.7	485	114	155	7	13	41	0	11
2005-07-03~07-31	107.1	6.6	594	127	150	3	43	81	29	3
2005-07-31~08-28	153.7	6.1	549	146	145	25	51	53	19	3
2005-08-28~09-25	148.7	6.4	426	105	99	16	23	41	14	14
2005-09-25~10-23	155.5	5.4	315	66	87	5	19	32	20	3
2005-10-23~11-20	152.4	7.5	342	85	105	7	15	23	12	23
2005-11-20~12-18	100.5	4.9	285	87	76	2	13	31	7	13
2005-12-18~2006-01-15	296.7	8.1	554	73	117	43	124	61	30	13
2006-01-15~02-12	258.7	9.7	839	130	194	39	111	100	69	10
2006-02-12~03-12	179.7	5.6	1813	343	551	94	171	142	71	23

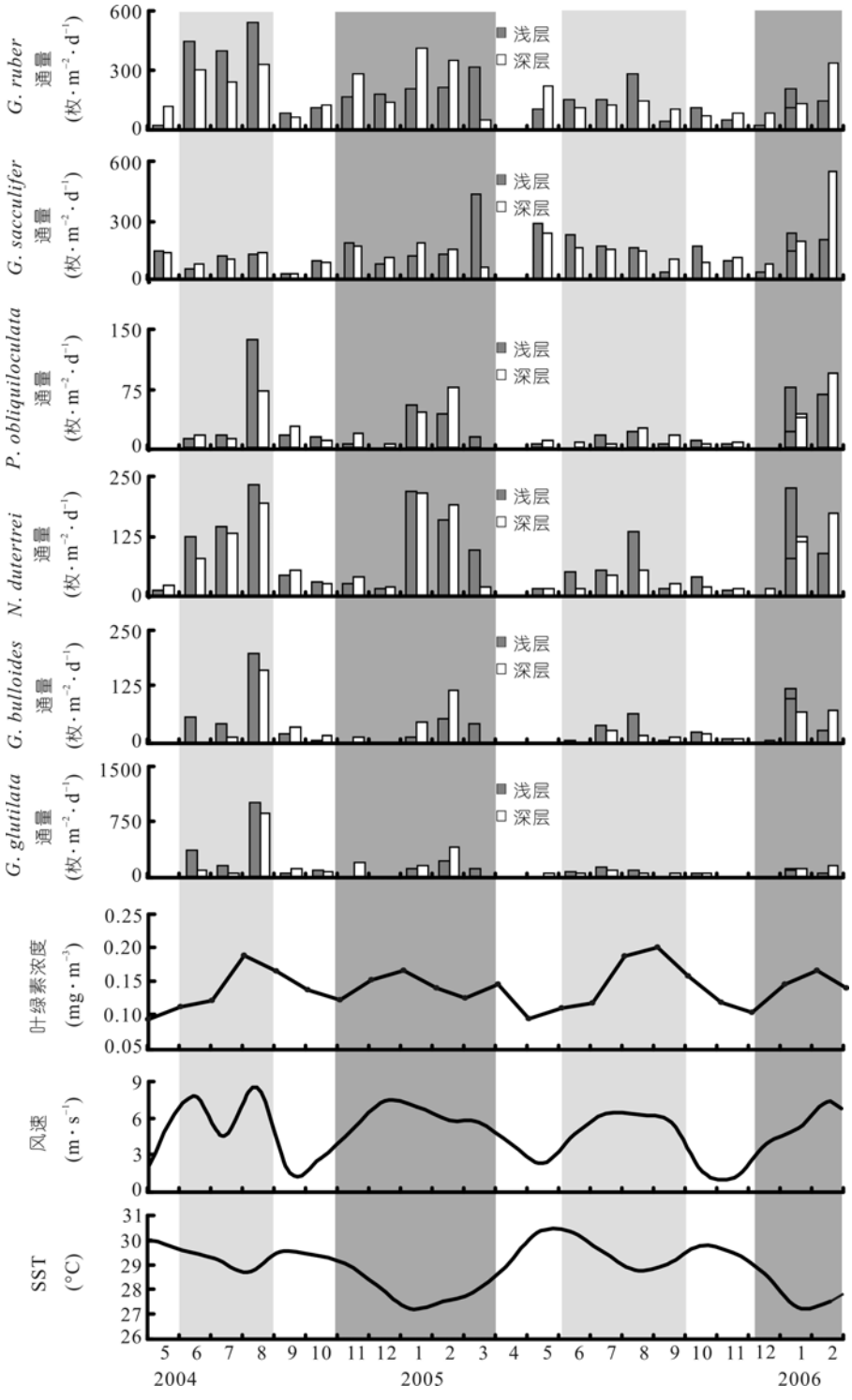

图 2　浮游有孔虫主要属种通量与叶绿素浓度、风速、表层海水温度 SST 的比较

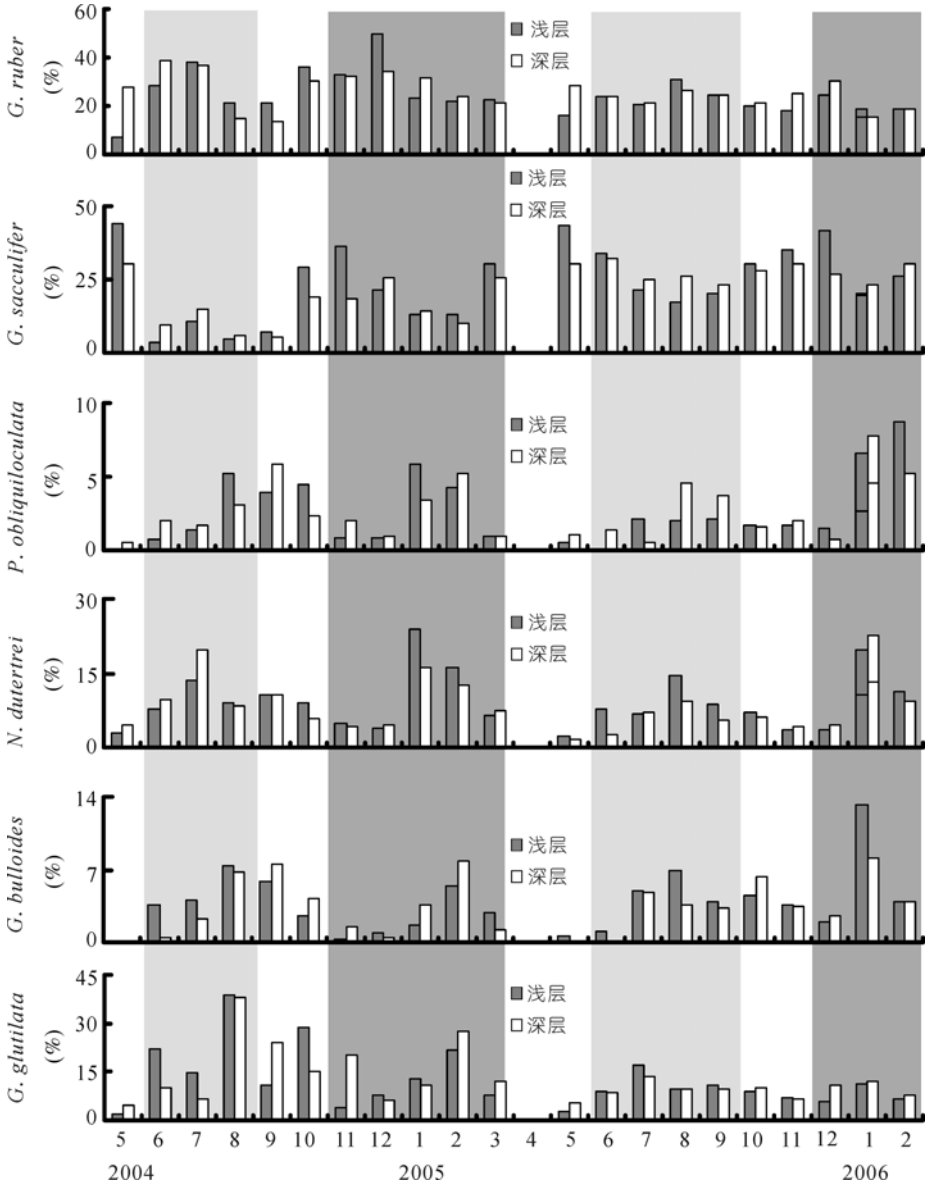

图 3　浮游有孔虫主要属种百分含量的季节变化

型模式(*P. obliquiloculata* 主要在冬季风强盛期通量高), 且随上层水体的叶绿素浓度和海表面风速大小变化而改变(图 4), 表明南沙海区生源颗粒通量主要受季风影响的表层生产力所控制. 南海季风盛行时期, 风速明显加大, 可以达到近 9 $m \cdot s^{-1}$, 常是季风间歇期风速的 3~4 倍. 因此, 尽管南海南部属于贫营养海域[26], 但强劲的季风强烈搅动上层海水, 将富含活性 N, P 和 Si 等营养元素的次表层水带到海洋上部混合层, 直接影响海水表层生产力, 最终可导致海洋钙质、硅质等生源颗粒通量的变化[40]. 所以受冬、夏季风影响的表层生产力是控制南沙海区生源颗粒的季节性变化的主要因素.

3　浮游有孔虫壳体同位素和Mg/Ca比值的季节变化

在南沙海区, 浅层与深层沉积物捕获器样品中的浮游有孔虫 *G. ruber*, *G. sacculifer*, *P. obliquiloculata* 和 *N. dutertrei* 的氧、碳稳定同位素和 Mg/Ca 比值大体一致(图 5~7), 说明了海水中碳酸盐

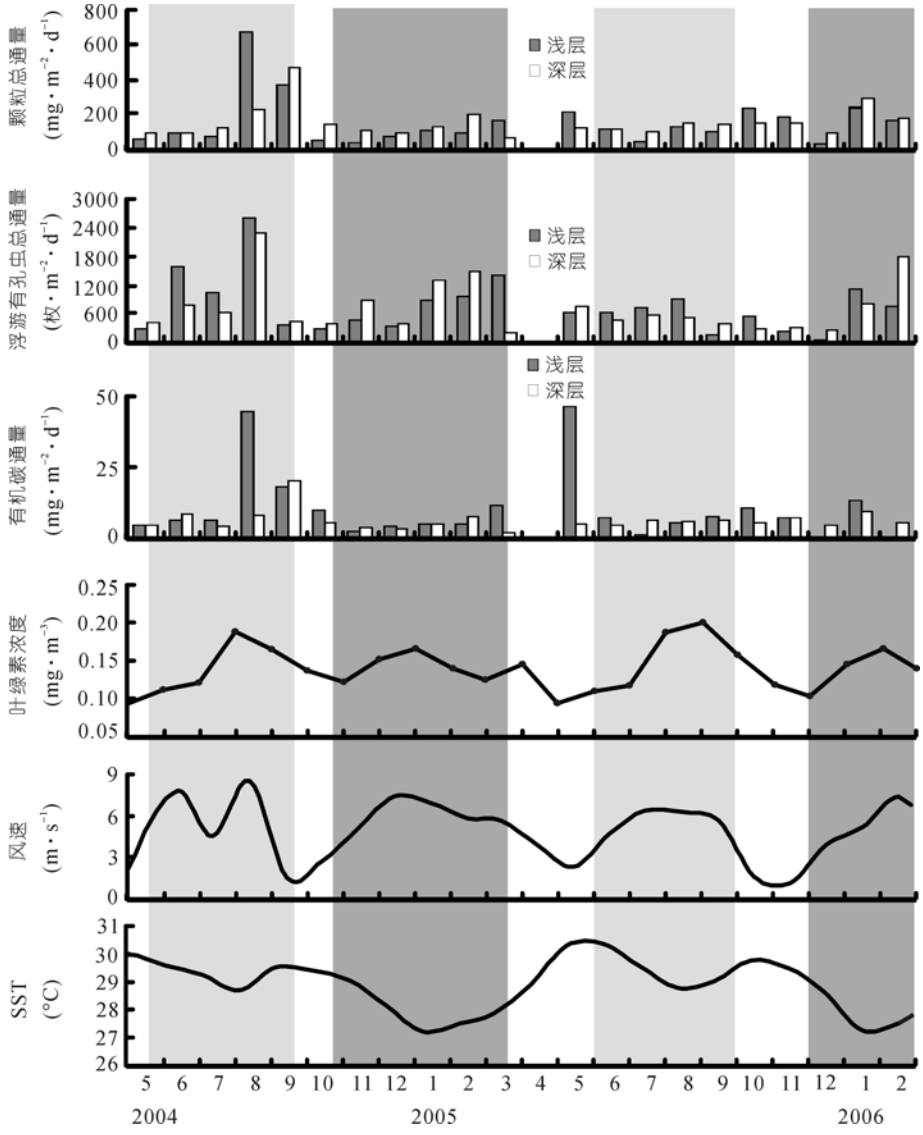

图 4　浮游有孔虫总通量与颗粒总通量和有机碳通量的比较

溶解作用对浮游有孔虫壳体的影响较弱. 从图 5 可以看出, *G. ruber*, *G. sacculifer*, *P. obliquiloculata* 和 *N. dutertrei* 的δ^{18}O 值分别在−3.60‰~−2.78‰, −3.30‰~−2.00‰, −2.83‰~−1.42‰, −2.54‰~−1.24‰之间变化, 年平均值分别为−3.30‰, −2.80‰, −2.03‰和−1.91‰. 4 个种的δ^{18}O 值依次变重, 反映了这 4 个种随着他们生活的平均水层依次变深, 海水温度也依次变低. 这一推断也得到了采用这 4 个种的壳体 Mg/Ca 比值估算的海水温度的证实. 图 7 显示 *G. ruber*, *G. sacculifer*, *P. obliquiloculata* 和 *N. dutertrei* 生活水层的年平均海水温度分别为 28.8, 27.2, 24.1, 23.7℃依次降低, 并且这 4 个种的生活水层海水温度的季节性差别逐渐减小. 在不考虑冰盖效应和当地盐度变化的情况下, 海水δ^{18}O 值 0.26‰的变化相当于海水温度变化 1℃[41]. 因此, *G. ruber*, *G. sacculifer*, *P. obliquiloculata* 和 *N. dutertrei* 的δ^{18}O 值依次变重, 代表的正好是这 4 个种的海水垂向温度梯度.

G. ruber, *G. sacculifer*, *P. obliquiloculata*, *N. dutertrei* 的δ^{18}O 值和 Mg/Ca 比值估算海水温度呈现明显的季节性变化. 冬季风盛行的 1~3 月δ^{18}O 值重, 海水温度低; 夏季风盛行的 7~9 月δ^{18}O 值相对偏轻, 海水温度相对高(图 5). 将这 4 个种的δ^{18}O 与该海区

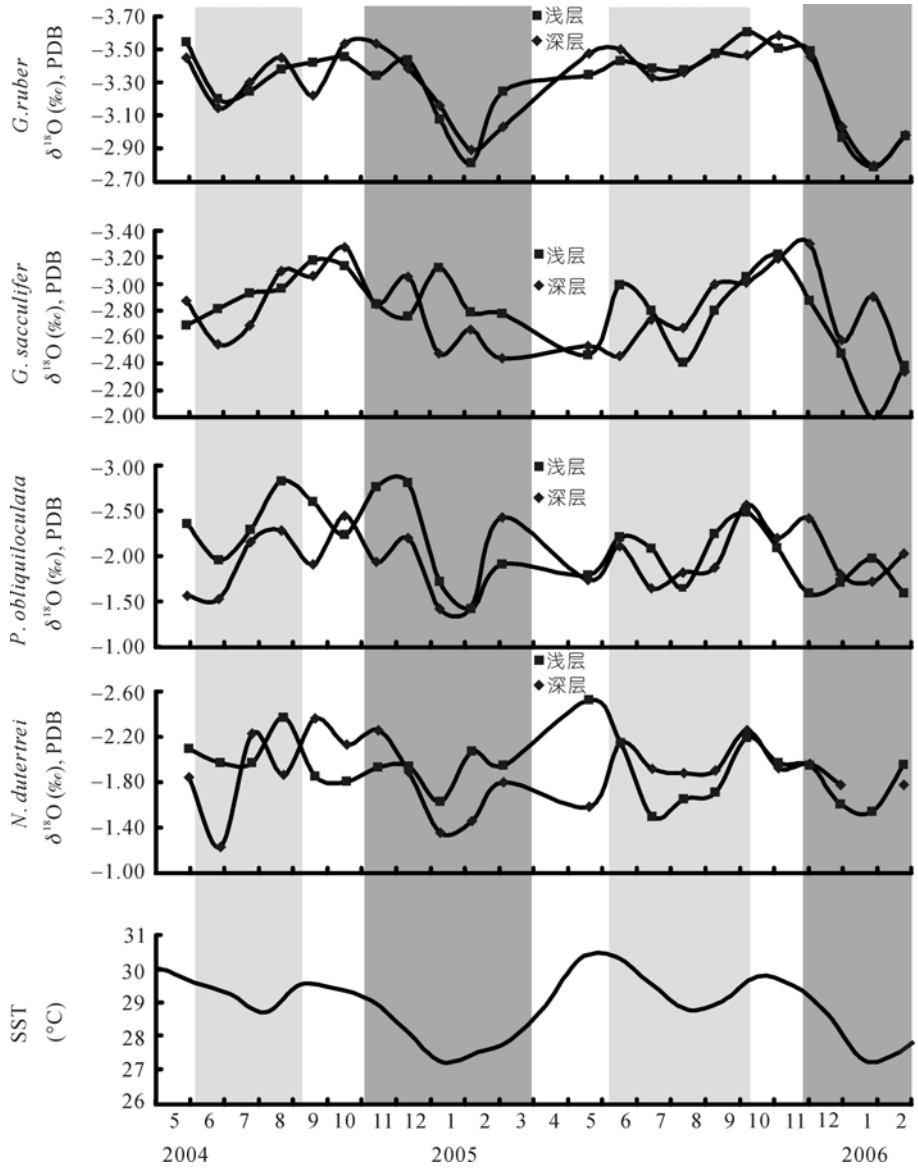

图 5　浮游有孔虫 *G. ruber*, *G. sacculifer*, *P. obliquiloculata* 和 *N. dutertrei* 的氧同位素季节变化

表层海水温度 SST 进行对比, 发现它们之间的变化趋势相反, 具有较好的负相关(*G. ruber* 的δ^{18}O 与 SST 之间的相关系数最大, 可达 0.73), 说明了在季节和年际尺度上, 浮游有孔虫无论是表层种、还是次表层种, 与季风环流影响的表层海水温度有很好的相关性, 其δ^{18}O 值主要受海水温度的控制. 这一点也同样得到了 Mg/Ca 比值估算的海水温度结果的支持. 采用 *G. ruber*, *G. sacculifer*, *P. obliquiloculata* 和 *N. dutertrei* 的壳体 Mg/Ca 比值估算的海水温度也呈现出冬季温度低、夏季温度高的特点(图 7). 有意思的是, *G. ruber*, *G. sacculifer*, *P. obliquiloculata* 和 *N. dutertrei* 的δ^{18}O 值的变化幅度分别约为 0.76‰, 0.84‰, 1.13‰和 1.46‰, 接近于 1.0‰, 相当于南海冰期/间冰期δ^{18}O 变化幅度(1.5‰~1.8‰)[42,43]的 2/3. 因此, 在用浮游有孔虫壳体来测定冰期/间冰期δ^{18}O 变化时, 样品不能只用少量个体来分析测试. 实际上, 如果采用海水δ^{18}O 值 0.26‰的变化相当于海水温度变化 1℃来计算, *G. ruber*, *G. sacculifer*, *P. obliquiloculata* 和 *N. dutertrei* 的δ^{18}O 值变化幅度也正好与 4 个种的 Mg/Ca 比值所计算的温度变化幅度相当(图 5 和

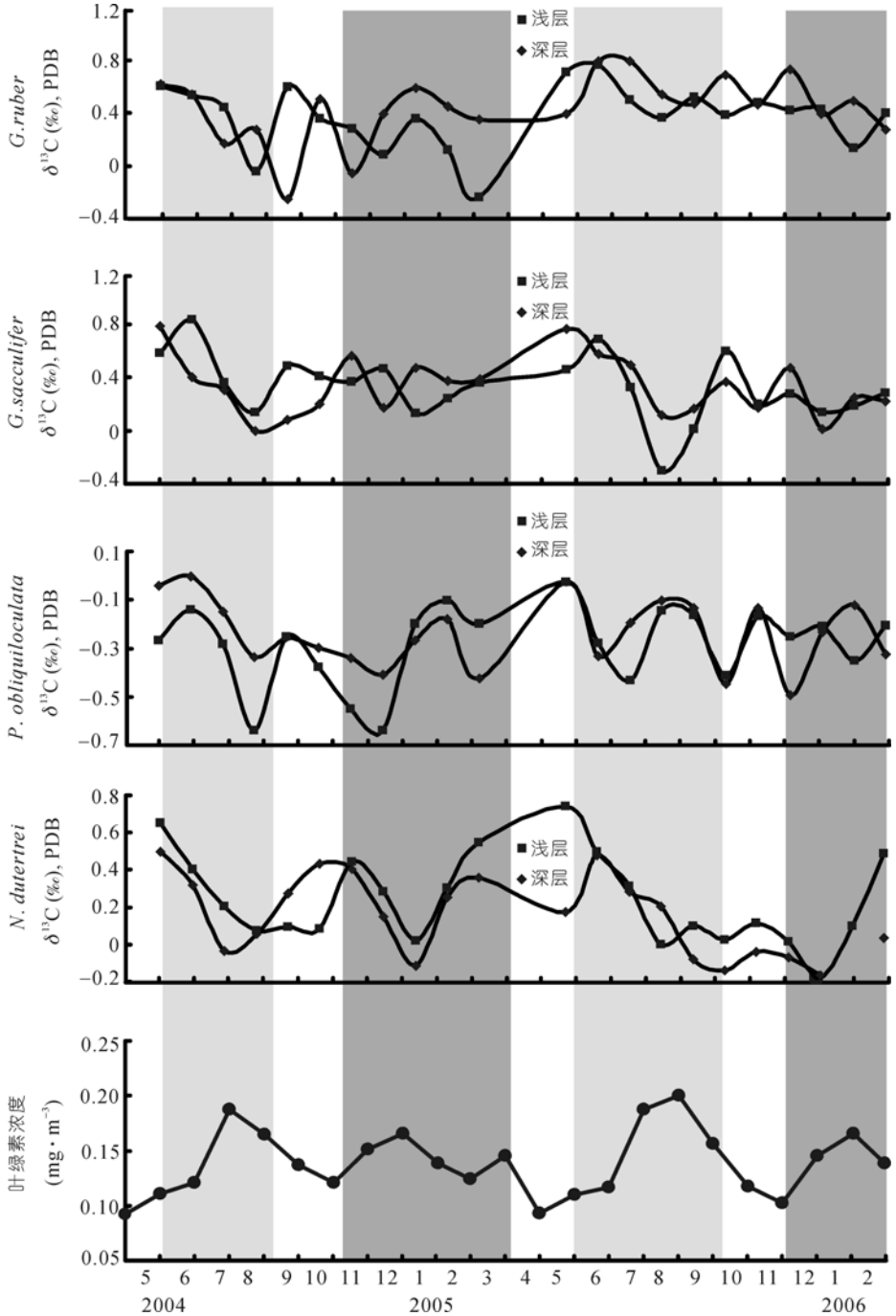

图 6　浮游有孔虫 *G. ruber*, *G. sacculifer*, *P. obliquiloculata* 和 *N. dutertrei* 的碳同位素季节变化

7), 说明南沙海区浮游有孔虫δ^{18}O 的季节变化主要反映的是海水温度变化.

G. ruber, *G. sacculifer*, *P. obliquiloculata* 和 *N. dutertrei* 的δ^{13}C 值变化较为复杂, 总体上看也具有季节性变化, 但与δ^{18}O 值的变化特征有所不同, δ^{13}C 值在冬、夏季风盛行期时都出现低值, 而在季风间歇期时相对偏高, 这与南海北部δ^{13}C 值冬季高、夏季低的特点不同[20]. 这可能是由于南沙海区处于西太平洋暖池边缘, 受冬、夏季风的影响都很明显, 并且季节温差在 4℃左右, 致使冬、夏季表层海水生产力差别

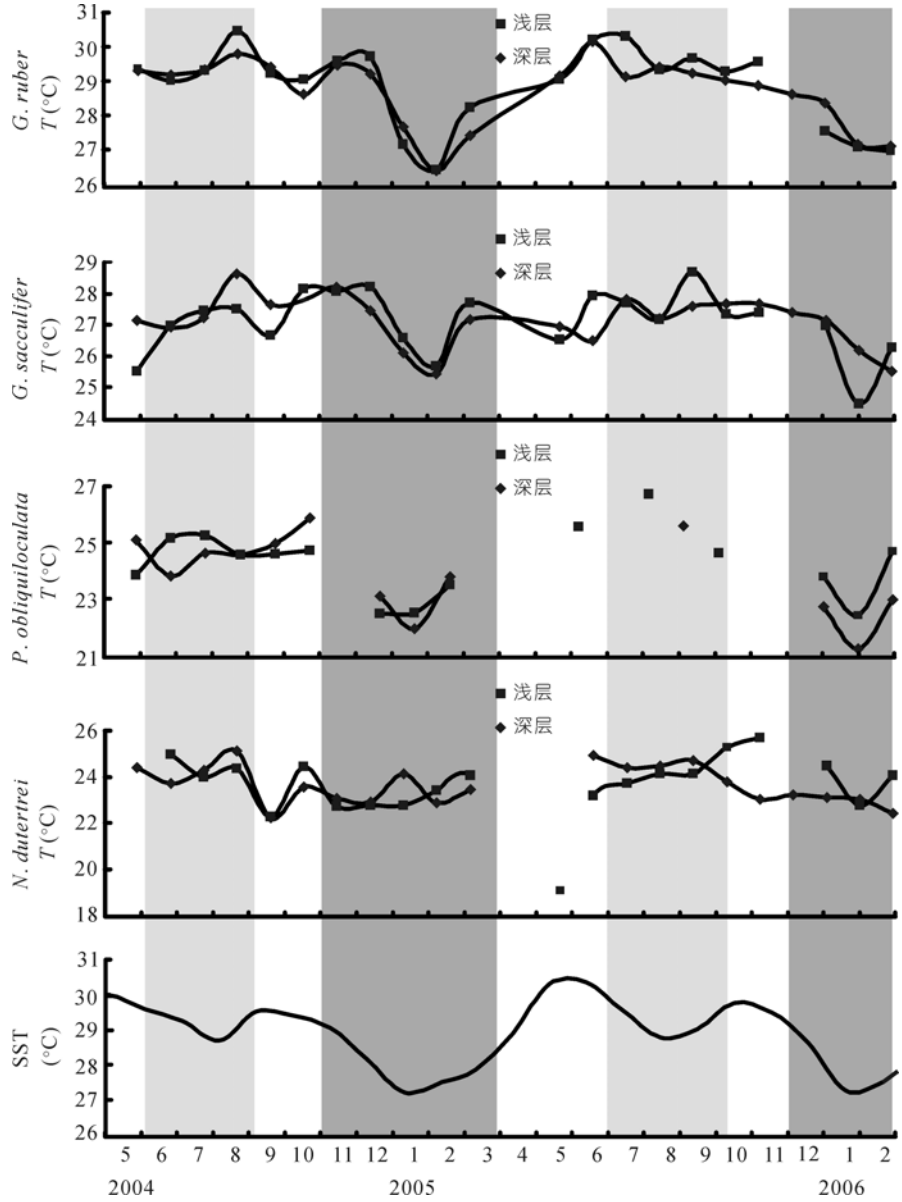

图 7　浮游有孔虫 *G. ruber*, *G. sacculifer*, *P. obliquiloculata* 和 *N. dutertrei* 的 Mg/Ca 比值估算温度

不大的缘故. 从图 6 可以看出, *G. ruber*, *G. sacculifer*, *P. obliquiloculata* 和 *N. dutertrei* 的δ^{13}C 值分别在 –0.25‰~0.79‰, –0.30‰~0.83‰, –0.64‰~–0.01‰, –0.17‰~0.75‰之间变化, 年平均值分别为 0.40‰, 0.33 ‰, –0.26‰和 0.20‰. 浮游有孔虫δ^{13}C 可以反映海水营养及生产力状况, 由于海水中浮游植物的光合作用和生物沉降过程中的降解作用, 浅层水种δ^{13}C 值通常较深层水种的高[44]. 在南沙海区, *G. sacculifer* 的δ^{13}C 值变化范围较 *G. ruber* 宽泛, 年均值差值仅 0.07‰, 这与南海北部[20]和中部[22]沉积物捕获器的研究结果的差别明显. 将 4 个种的δ^{13}C 值与该区叶绿素浓度对比, 结果显示出相反的变化趋势(图 6), 表明在季节和年际尺度上, 浮游有孔虫表层种、次表层种的δ^{13}C 可能主要受与季风关联的海水生产力的控制.

4　结论

(1) 南沙海区浅层和深层捕获器中浮游有孔虫总通量和主要属种 *G. ruber*, *G. sacculifer*, *N. dutertrei*, *G. glutinata* 及 *G. bulloides* 通量存在明显的季节变化,

与颗粒总通量、有机碳通量一样, 高值出现在东北季风或西南季风盛行期, 低值出现在季风间歇/过渡期, 呈现典型的“双峰型”通量模式. 次表层种 *P. obliquiloculata* 通量主要在冬季风盛行期显示高值, 而特殊地在 2004 年 8 月亦出现峰值, 其通量的季节性模型有待探讨. 通过与上部水体叶绿素浓度和海面风速大小的比较, 揭示受季风影响的表层生产力是南沙海区生源颗粒通量和浮游有孔虫群季节变化的主要控制因素.

(2) 浮游有孔虫壳体δ^{18}O 及 Mg/Ca 比值存在明显的季节性变化. 浮游有孔虫壳体δ^{18}O 值与 SST 变化趋势相反, 而基于 Mg/Ca 比值的海水温度与 SST 变化趋势相同. 冬季风盛行期δ^{18}O 值重, 海水温度低; 夏季风盛行期δ^{18}O 值相对偏轻, 海水温度相对高. 南沙海区浮游有孔虫δ^{18}O 的季节变化主要反映的是海水温度变化, 不同深度属种的δ^{18}O 变化反映了上层海水温度梯度. 此外, 壳体δ^{13}C 值大体上在东亚季风强盛期低、季风间歇期高, 与叶绿素浓度的变化趋势相反, 说明浮游有孔虫δ^{13}C 值包含着水体营养和生产力的信息, 可能反映了海水表层生产力的变化.

致谢 沉积物捕获器收取和施放以及样品回收由同济大学李建如博士等完成, 分析和写作得到叶黎明、党皓文和王跃等人的帮助, 审稿人提出宝贵的修改意见和建议, 在此一并深表感谢.

参考文献

1 Hemleben C, Spindler M, Anderson O R. Modern Planktonic Foraminifera. New York: Springer-Verlag, 1989. 363
2 Fairbanks R G, Wiebe P H. Foraminifera and chlorophyll maximum: Vertical distribution, seasonal succession and paleoceanographic significance. Science, 1980, 209: 1524—1526
3 Bemis B E, Spero H J, Bijima J, et al. Reevaluation of the oxygen isotopic composition of Planktonic foraminifera: Experimental results and revised paleotemperature equations. Paleoceanography, 1998, 13: 150—160
4 Zărić S, Donner B, Fischer G, et al. Sensitivity of planktonic foraminifera to sea surface temperature and export production as derived from sediment trap data. Mar Micropaleontol, 2005, 55: 75—105
5 Nürnberg D, Bijma J, Hemleben C. Assessing the reliability of magnesium in foraminiferal calcite as a proxy for water mass temperatures. Geochim Cosmochim Acta, 1996, 60: 803—814
6 陈建芳, 郑连福. 沉积捕获器与全球变化研究. 海洋通报, 1996, 15: 41—47
7 Kuroyanagi A, Kawahata H, Nishi H, et al. Seasonal to interannual changes in planktonic foraminiferal assemblages in the northwestern North Pacific: Sediment trap results encompassing a warm period related to El Niño. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 2008, 262: 107—127
8 Pak D K, Kennett J P. A foraminiferal isotopic proxy for upper water mass stratification. J Foramin Res, 2002, 32: 319—327
9 Pak D K, Lea D W, Kennett J P. Seasonal and interannual variation in Santa Barbara Basin water temperatures observed in sediment trap foraminiferal Mg/Ca. Geochem Geophys Geosyst, 2004, 5: Q120008, doi: 10.1029/2004GC000760
10 Mohiuddin M M, Nishimura A, Tanaka Y, et al. Seasonality of biogenic particle and planktonic foraminifera fluxes: Response to hydrographic variability in the Kuroshio extension, northwestern Pacific Ocean. Deep-Sea Res I, 2004, 5: 1659—1683
11 Mohiuddin M M, Nishimura A, Tanaka Y. Seasonal succession, vertical distribution, and dissolution of planktonic foraminifera along the Subarctic front: Implications for paleoceanographic reconstruction in the northwestern Pacific. Mar Micropaleontol, 2005, 55: 129—156
12 Yamasaki M, Sasaki A, Oda M, et al. Western equatorial Pacific planktonic foraminiferal fluxes and assemblages during a La Niña year (1999). Mar Micropaleontol, 2008, 66: 304—319
13 Romeo O, Boeckel B, Donner B, et al. Seasonal productivity dynamics in the pelagic central Benguela System inferred from the flux of carbonate and silica organisms. J Mar Syst, 2002, 37: 259—278
14 Schiebel R, Hemleben C. Interannual variability of planktonic foraminiferal populations and test flux in the eastern North Atlantic Ocean (JGOFS). Deep-Sea Res II, 2000, 47: 1809—1852
15 Northcote L C, Neil K L. Seasonal variations in foraminiferal flux in the Southern Ocean, Campbell Plateau, New Zealand. Mar Micropaleontol, 2005, 56: 122—137
16 King A L, Howard W R. δ^{18}O seasonality of planktonic foraminifera from Southern Ocean sediment traps: Latitudinal gradients and implications for paleoclimate reconstructions. Mar Micropaleontol, 2005, 56: 1—24
17 Unger D, Ittekkot V, Schafer P, et al. Seasonality and interannual variability of particle fluxes to the deep Bay of Bengal: Influence of

riverine input and oceanographic processes. Deep-Sea Res II, 2003, 50: 897—923
18 Stoll H M, Arevalos A, Burke A, et al. Seasonal cycles in biogenic production and export in Northern Bay of Bengal sediment traps. Deep-Sea Res II, 2007, 54: 558—580
19 Zheng L F, Zheng Y L, Erlenkeuser K, et al. Seasonal variation in the flux and isotopic composition of planktonic foraminifera in the northern South China Sea. In: Key Lab of Submarine Geosciences, SOA, eds. Oceanography in China. Beijing: China Ocean Press, 2002. 17—22
20 Lin H L, Wang W C, Hung G W. Seasonal variation of planktonic foraminiferal isotopic composition from sediment traps in the South China Sea. Mar Micropaleontol, 2004, 53: 447—460
21 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季节和年际变化. 海洋学报, 2006, 28: 72—80
22 成鑫荣, 陈荣华, 翦知湣, 等. 南海中部沉积物捕获器中浮游有孔虫的稳定同位素分析. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22: 73—78
23 Huang K F, You C F, Lin H L, et al. *In situ* calibration of Mg/Ca ratio in planktonic foraminiferal shell using time series sediment trap: A case study of intense dissolution artifact in the South China Sea. Geochem Geophys Geosyst, 2008, 9: Q04016, doi: 10.1029/2007GC001660
24 Wang P X, Li Q Y. The South China Sea: Paleoceanography and Sedimentlogy. Springer Science+Business Media B.V., 2009, doi: 10.1007/978-1-4020-9745-4
25 方文东, 郭忠信, 黄羽庭. 南海南部海区的环流观测研究. 科学通报, 1997, 42: 2264—2271
26 林洪瑛, 韩舞鹰. 南沙群岛海域营养盐分布的研究海洋科学. 海洋科学, 2001, 25: 12—14
27 Bé A W H. An ecological, zoogeographic, and taxonomic review of recent planktonic foraminifera. In: Ramsey A T S, ed. Oceanic Micropaleonology. London: Academic Press, 1977. 1—100
28 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. Mar Micropaleontol, 2005, 54: 125—139
29 Anand P, Elderfield H, Conte M H. Calibration of Mg/Ca thermometry in planktonic foraminifera from a sediment trap time series. Paleoceanography, 2003, 18: 1050, doi: 10.1029/2002PA000846
30 Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. The NCEP/NCAR reanalysis 40-year project. Bull Amer Meteor Soc, 1996, 77: 437—471
31 Prell W L, Damuth J E. The climate-related diachronous disappearance of *Pulleniatina obliquiloculata* in late Quaternary sediments of the Atlantic and Caribbean. Mar Micropaleontol, 1978, 3: 267—277
32 Li B H, Jian Z M, Wang P X. *Pulleniatina obliquiloculata* as a paleoceanographic indicator in the southern Okinawa Trough during the last 20000 years. Mar Micropaleontol, 1997, 32: 59—69
33 Fairbanks R G, Sverdlove M, Free R, et al. Vertical distribution and isotopic fractionation of living planktonic foraminifera from the Panama Basin. Nature, 1982, 298: 841—844
34 Lin H L, Hsieh H Y. Seasonal variations of modern planktonic foraminifera in the South China Sea. Deep-Sea Res II, 2007, 54: 1634—1644
35 Schiebel R, Waniek J, Bork M, et al. Planktic foraminiferal production stimulated by chlorophyll redistribution and entrainment of nutrients. Deep-Sea Res Part I, 2001, 48: 721—740
36 Asahi H, Takahashi K. A 9-year time-series of planktonic foraminifer fluxes and environmental change in the Bering Sea and the central subarctic Pacific Ocean, 1990—1999. Prog Oceanogr, 2007, 72: 343—363
37 Gupta A K, Anderson D M, Overpeck J K. Abrupt change in the Asian southwest monsoon during the Holocene and their links to the North Atlantic Ocean. Nature, 2003, 421: 354—357
38 Naidu P D, Malmgren B A. Monsoon upwelling effects on test size of some planktonic foraminifera species from the Oman Margin, Arabian Sea. Paleoceanography, 1995, 10: 117—122
39 崔喜江, 向荣, 郑范, 等. 南海南部活体浮游有孔虫分布特征及其影响因素初探. 热带海洋学报, 2006, 25: 25—30
40 Nowald N, Karakas G, Ratmeyer V, et al. Distribution and transport processes of marine particulate matter off Cape Blanc (NW-Africa): Results from vertical camera profiles. Ocean Sci Discuss, 2006, 3: 903—938
41 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. Mar Geol, 1982, 46: 217—233
42 Wang P X, Wang L J, Bian Y H, et al. Late Quaternary paleoceanography of the South China Sea: Surface circulation and carbonate cycles. Mar Geol, 1995, 127: 145—165
43 Wang P X. Response of Western Pacific marginal seas to glacial cycles: Paleoceanographic and sedimentological features. Mar Geol, 1999, 156: 5—39
44 Gasperi J T, Kennett J P. Miocene planktonic foraminifera at DSDP Site 289: Depth stratification using isotopic difference. Proc Ocean Drilling Program, 1993, 130: 323—332