

南海第四纪古海洋学研究进展*

赵泉鸿 汪品先

(同济大学海洋地质开放实验室, 上海 200092)

摘要 南海第四纪古海洋学研究, 在近5年来取得迅速发展。从1994年的中德合作太阳号SO-95航次到1999年的ODP184航次, 南海已经成为国际古海洋学研究的新热点。在地层学方面, 南沙海区首次建起中国海第一个更新世深海地层序列, 使用了包括4类微体化石的生物地层学、磁性地层学、同位素地层学和碳酸盐地层学的依据; 至于最近4万年来的记录, 东沙附近站位的时间分辨率精度已超过20a。文章还综述了海水表层温度等古海洋学参数测定, 深海沉积中古气候, 特别是古季风演变记录, 以及深海沉积作用和突变事件等方面的研究进展。

关键词 古海洋学 第四纪 南海

1 前言

在西太平洋边缘海系列中, 南海占有特殊的地位, 北靠中国大陆, 南属西太平洋暖池, 西侧其集水盆地直上青藏高原, 东边以巴士海峡联通西太平洋。地处东亚季风带, 冬、夏海流随风向逆转, 是亚洲夏季风最早爆发地^[1]。陆架广阔、群岛如链, 冰期旋回中随海面升降其地理变迁至为强烈^[2]。南海的形态和地理位置决定其对环境变迁的灵敏性, 而南海陆坡又以其高沉积速率和碳酸盐保存条件, 弥补了西太平洋深水区的不足。80年代晚期, AMS¹⁴C测年法问世不久就首先选择南海进行晚第四纪年代和地层学试点^[3,4], 而我国的古海洋学研究也以南海作为重点, 决非偶然。近年来, 随着海峡两岸我国海洋学界的积极投入, 国际学术界对南海古海洋学的兴趣急剧增长, 1999年春以南海东亚季风记录为主题的大洋钻探(ODP)184航次, 更把南海古环境研究推向高潮。可以确定地说, 南海已经成为国际古海洋学研究的新热点。

与早已享有国际声誉的陆上第四纪研究不同, 我国的海洋第四纪研究起步较晚, 而且长期来以近岸浅海为主。以深海研究为特点的古海洋学研究在我国从80年代开始以来, 由于缺乏高质量的深海沉积样品和先进的分析手段, 发展初期步履维艰。进入90年代, 我国古海洋学研究大力开展国际合作, 同时与国内的陆上研究紧密结合, 取得了相当高速度的发展, 开始跻身于国际行列, 而发展的主战场正是南海。回顾起来, 南海的古海洋学研究经历了3个阶段。

80年代中期以前, 是南海古海洋学的准备阶段。有关表层沉积、陆架地层和个别深海

第一作者简介: 赵泉鸿 男 58岁 教授 海洋地质学专业 E-mail: qhzhao@online.sh.cn

* 国家自然科学基金(批准号: 49732060和49676287)资助项目
1999-07-23收稿

柱状样的分析, 虽然还没有直接探讨古海洋学的问题, 却为今后的研究提供了宝贵资料。其中特别值得提出的是微体古生物学方面的工作^[5-8], 不仅对表层沉积中的有孔虫、介形虫和钙质超微化石群进行描述, 而且涉及浮游有孔虫的深海溶解作用^[9,10]和晚第三纪以来的生物地层学问题^[11,12]。

1986年可以说是南海古海洋学研究中具开创性的一年, 在其北部陆坡^[13]、南沙海区^[14]和西沙群岛^[15], 同时发表了晚第四纪氧同位素剖面, 其中北部陆坡还首次提供了南海海水古温度, 探讨了冰期碳酸盐旋回。紧接着南海古生态转换函数古温度的成果发表^[16], 并且在第三届国际古海洋学大会上通过邀请报告介绍了南海古环境的放大效应^[17]。与此同时, 我国在南沙海区进行了大量工作^[18-20], 以南海第四纪古海洋学和古环境研究的成果大量涌现, 仅专著或论文集便不下十余册^[21-24]。这个阶段的特点是以我国的工作为主, 可惜取得的大量成果主要只在国内发表, 在国际刊物上却以美国^[25]和德国^[26]的论文比较显著。

1994年春中德合作, 以“太阳号”(SONNE)调查船在南海进行了为期3周的古海洋

学专题调查。这次以“追踪季风”为主题的SO-95航次从南海南北深水区取得柱状样48个, 其中最长的近20m, 测制浅地层剖面约5000km, 把南海古海洋学推进到一个新阶段^[27,28]。接着, “太阳号”又接连前来南海(1996年的SO-114航次、1997年的SO-115航次和1998年的SO-130航次), 对巽他陆架和火山灰分布等问题进行考察; 法国“Marion Dufresne”执行国际“海洋古全球变化(IMAGES)”计划, 于1997年在南海取得长柱状样9个, 最长的达48.72m。1999年2~4月, 大洋钻探(ODP)184航次在南沙和东沙附近进行深水钻探, 研究东亚季风的演变史, 从6个站位取岩芯近5000m, 通过“一点三孔”的方法在每一站位都取得了完全连续的第四纪细粒、富钙的深海沉积剖面, 最高沉积速率可达450m/Ma¹⁾, 为西太平洋区提供了研究古海洋学的最佳剖面。

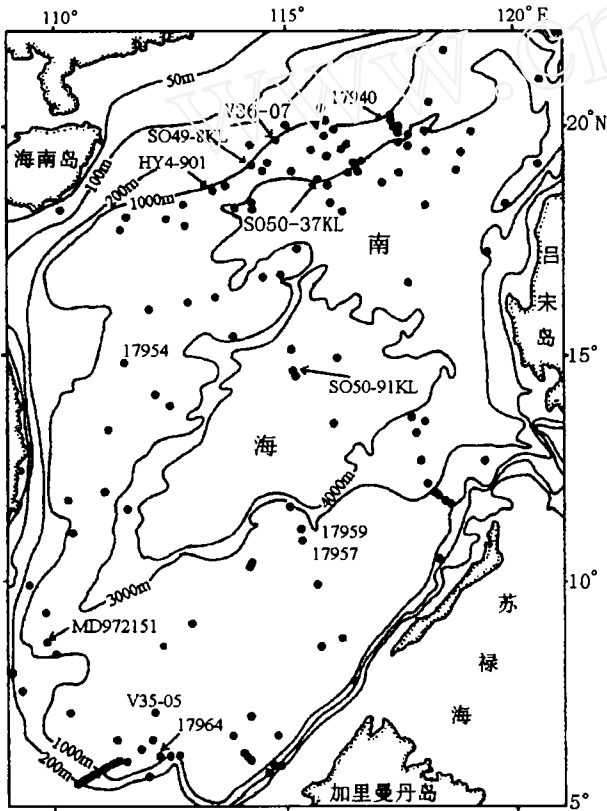


图1 南海深海第四纪已进行古海洋学分析的柱状样站位
本文所引用的站位, 均在图中标示出站位编号

Fig.1 Location of Quaternary seep-sea cores analyzed for paleoceanography in the South China Sea

1) Wang P, Prell W, Blum P *et al.* Proceedings of the Ocean Drilling Program, Initial Reports, 184. 1999

1994年以来南海古海洋学研究在国际学术界逐年升温,同时海峡两岸中国科学家的工作也大踏步走向国际,其中仅《Marine Micropaleontology》学报的“中国微体古生物专辑”^[29]和《Marine Geology》学报的“西太平洋边缘海对全球气候变化的响应专辑”^[30]两册,便发表了我国学者有关南海古海洋学等研究的论文15篇。国内仅《中国科学》一刊从1998年以来就发表南海古海洋学论文6篇,在台北出版的“地球科学集刊”,最近在“IMAGES计划专刊”(1999年,10期1号)中也发表了南海论文4篇。南海的古海洋学研究无论在广度和深度上都有了飞跃式的进步,这也正是本文综述的重点所在。

经过1985年前的准备阶段、1986~1993年的初步阶段和1994年以来的迅速发展阶段,南海进入了国际古海洋学研究的前列。据不完全统计,南海水深超过150m的深水沉积柱状样,至少有150个经过古海洋学和相关课题的分析研究(图1),而且集中在90年代以来的几年中(表1)。研究范围覆盖了古海洋学各个主要领域,而且更多的成果目前正在整理、发表中。本文仅就深海区古海洋学研究几个方面的现状进行综述,不包括第四纪珊瑚礁及其古环境和陆架海平面变化等研究成果。古海洋学研究内容广泛,文中难免有遗漏和谬误之处,恳请同行指正。

表1 南海深海第四纪已进行古海洋学分析的柱状样数量及分析项目统计

Table 1 Quaternary paleoceanographic studies in the South China Sea: Number of studied deep-sea cores and items of analyses

年代	分析项目																	年龄	分析柱状样个数	论文数量					
	古生物分析							物理和化学分析																	
	有孔虫	钙质超微化石	翼足类	介形虫	硅藻	放射虫	沟鞭藻	孢粉	氧碳同位素	碳酸钙	粗组分	粒度	地球化学	矿物学	火山灰	D ₁₅	Ca/Ca				蛋白石	有机碳	磁化率	古地磁年龄	¹⁴ C年龄
1986年前	3	2	3					1	1	1												3	3		
1986~1990年	18	11	4	7	9	5	6	2	15	13	1	7	5	7	7							3	2	28	19
1991~1995年	33	9	1	6	9	5	13	3	37	60	2		13	5	6	1			13	38	7	7	105	79	
1995年后	33	4	5	1		2	1	1	31	15	6	5	5	1	3	6	2	2	8	24	3	10	68	66	

2 深海地层学进展

借助于陆坡次深海沉积的高沉积速率和保存良好的钙质微体化石,南海的第四纪深海地层学在海内外学术界的共同努力下,近年来成绩卓著,无论在多学科的时间序列或高分辨率时间序列的建立上都取得了成功,生物地层学、同位素地层学、碳酸盐地层学、磁性地层学等不同方法均在南海沉积中得到应用。

2.1 生物地层学

南海第四纪地层中已经研究的微体化石门类之多,不仅在我国诸海中首屈一指,亦为西太平洋边缘海中所仅见。除浮游和底栖有孔虫、钙质超微化石外,放射虫^[31,32]、硅藻^[33]、沟鞭藻^[34]、翼足类^[35,36]、介形虫^[37,38]、孢子花粉^[39,40]等门类,都在深海沉积中得到应用。原来主要依靠浮游有孔虫和钙质超微化石的深海生物地层学^[41~43],已经扩展到放射

虫和底栖有孔虫,从而在南沙海区(17957 柱状样)建立起由 4 类微体化石支撑的生物地层序列^{[44] 1) 2)},是目前我国海区已发表的时序最长的第四纪深海地层剖面(表 2)。在最近完成的南海 ODP 184 航次中,海峡两岸的中国学者顺利地承担了生物地层学的主要任务,与这些年的工作积累是分不开的。

表2 南沙海区17957柱状样第四纪深海地层学事件^{[44] 1) 2)}

Table 2 Quaternary stratigraphic events recognized from Core 17957, southern South China Sea

类别	柱深/cm	事件	年龄/Ma
浮游有孔虫	180	<i>Globigerinoides ruber</i> (红色壳)末现面	0.12
放射虫	290~300	<i>Buccinosphaera invaginata</i> 初现面	0.21
放射虫	550	<i>Collosphaera tuberosa</i> 初现面	0.42~0.46
放射虫	560	<i>Stylatractus universus</i> 末现面	0.43~0.46
颗石藻	560	<i>Pseudoemiliana lacunosa</i> 末现面	0.45
底栖有孔虫	690	<i>Stilostomella</i> 灭绝	0.62
放射虫	760~770	<i>Pterocorys campanula</i> 末现面	0.72~0.73
古地磁	795	布容/松山界线	0.788
古地磁	967	加拉米洛事件顶面	0.99
古地磁	1 020	加拉米洛事件底面	1.07
放射虫	1 080~1 090	<i>Anthocyrtidium angulare</i> 末现面	1.10
古地磁	1 120	Cobb 山事件	1.20~1.21
放射虫	1 140~1 150	<i>Lamprocyrtis neoheteroporos</i> 末现面	1.2~1.4

2.2 同位素地层学

自从 1986 年南海首次建立晚第四纪氧同位素地层剖面^[13, 14]以来,至少有 65 个柱状样进行了氧同位素分析(见表 1),成为南海深海地层学最重要的支柱。目前已经建立的氧同位素地层序列,时序最长的在南沙 17957 柱状样(10° 51' N, 115° 18' E, 水深 2 197m, 柱长 13.84m)一直上溯到百余万年前的氧同位素逾 40 期(图 2)。而晚第四纪氧同位素地层剖面分辨率最高的是东沙东南的 17940 柱状样(20° 07' N, 117° 23' E, 水深 1 728m, 柱长 13.15m),全新世部分以 1~2cm 的间距取样分析 *Globigerinoides ruber* 的氧同位素,加上 40 个样品单种有孔虫的 AMS ¹⁴C 测年值,使时间分辨率精度超过 20a,是中国海深水沉积研究的分辨率最高记录^[45, 46],揭示出冰消期内的地层详细分期和冰期时的“亚轨道事件”,而且具有很好的代表性。如南海西北部的 HY4-901 柱状样(18° 49' N, 113° 28' E, 水深 1 120m, 柱长 2.50m)以 1cm 间距取样,氧同位素曲线^[47]与 17940 柱状样对比十分良好(图 3)。

1) Jian Z, Wang P, Chen M-P *et al.* Foraminiferal responses to major Pleistocene paleoceanographic changes in the South China Sea. 1999

2) 王汝建,李保华,成鑫荣等. 南海深水第四纪生物地层学研究. 见本期 541~548 页

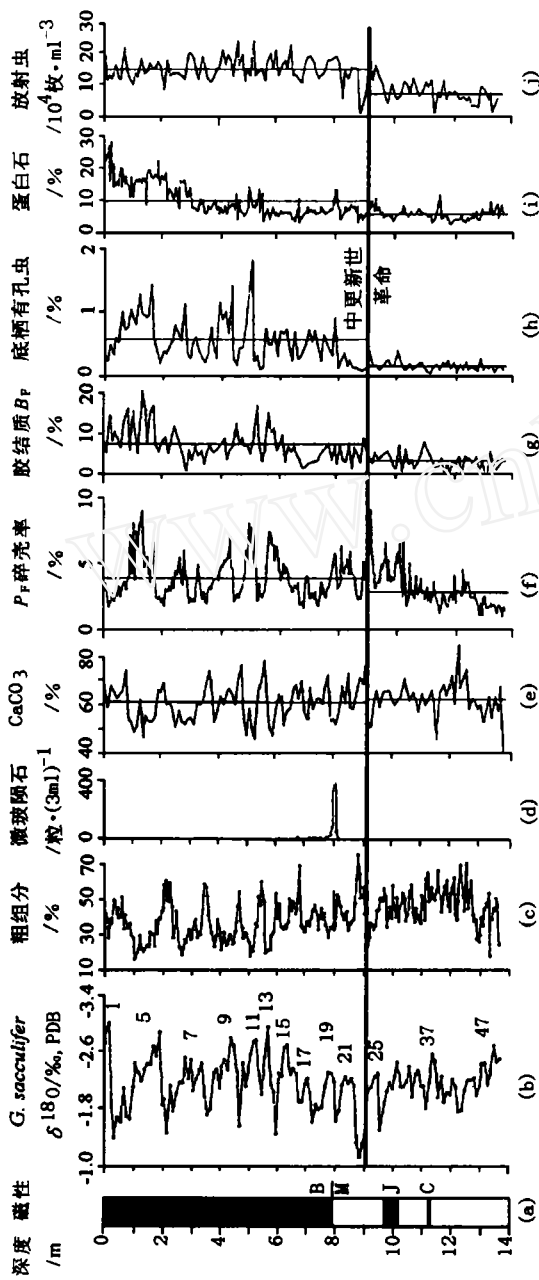


图2 南沙深水区17957柱状样分析结果

(a) 古地磁 (b) 氧同位素 (c) 粗组分 (d) 微玻璃层 (e) $CaCO_3$ (f) 浮游有孔虫碎壳率
 (g) 底栖有孔虫中的胶结质比例 (h) 底栖有孔虫占全群比例 (i) 蛋白质丰度 (j) 放射虫含量
 P.F. 浮游有孔虫 B.F. 底栖有孔虫

Fig.2 Core 17957 from the southern South China Sea

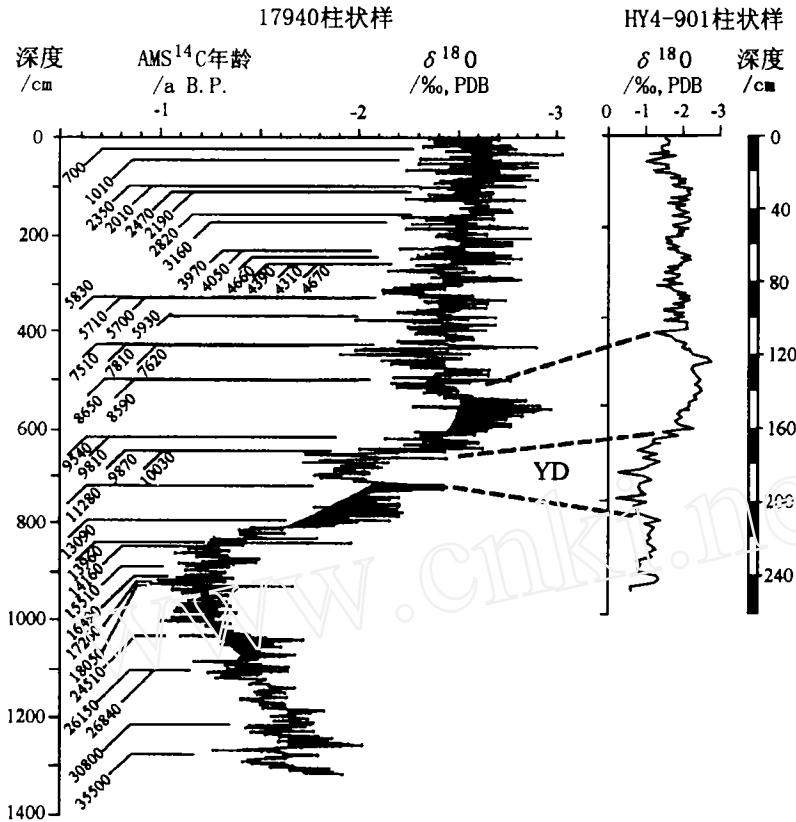


图3 南海北部17940柱状样和HY4-901柱状样高分辨率氧同位素剖面对比
17940 $\delta^{18}\text{O}$ 用*G. ruber*, HY4-901用*G. sacculifer*测定,17940所注数值为AMS ^{14}C 测年
数值(未经换算)。两柱状样的地层对比十分良好,新仙女木期(YD)十分明显。注意两柱所用
 $\delta^{18}\text{O}$ 坐标相差5倍(据[45,47]绘制)

Fig.3 A comparison of high resolution $\delta^{18}\text{O}$ curves between Cores 17940 and
HY4-901 from the northern South China Sea (from [45, 47])

2.3 碳酸盐地层学

古海洋学研究的初期,便发现其晚第四纪地层的 CaCO_3 曲线与 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线几乎平行^[13], 随后的工作表明这在深水碳酸盐溶跃面(一般在3000m左右)以上属于普遍现象^[23,24], 因此在南海晚第四纪地层划分对比中得到广泛应用^[27,28]。最近台湾大学的工作表明, CaCO_3 曲线甚至可以反映千年等级的“亚轨道周期”^[48]。

有趣的是与碳酸盐溶解密切相关的粗组分分析(指颗粒直径 $> 63\mu\text{m}$ 所得的粗颗粒所占%) 在印度洋地层学应用成功后,也在南海证明有效。17957柱状样的粗组分曲线与 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线相当吻合(见图2)^[44],同样可以用来划分和对比冰期旋回,被称为“粗组分地层学”。

2.4 磁性地层学

尽管古地磁分析和磁化率分析在南海沉积中已经进行多次,迄今最为成功的仍是南

沙海区的 17957 柱状样。法国 CEA-CMRS 气候与环境科学实验室用 U 形管连续采取古地磁样品,在 17957 柱发现了布容/松山界线(0.788Ma B.P.)、加拉米洛事件顶面(0.99Ma B.P.)和底面(1.07Ma B.P.)及 Cobb 山事件(1.20~1.21Ma B.P.)等时间面(见图 2)。同时,常规的古地磁研究也取得新进展^[49,50]。磁化率曲线已从许多柱状样取得^[27],最近大洋钻探航次表明在第四纪冰期旋回中是地层对比的最佳依据之一。

总之,在南海深水区已经建立起 17957 站为代表的长时序地层剖面和以 17940 站为代表的高分辨率地层剖面。最近,大洋钻探为南海取得了年代长达 3 000 多万年的地层序列。提供高分辨率地层序列的 17940 柱状样因长度限制(13.15m)所代表年龄不超过 4 万年^[46],1997 年的 IMAGES-III 航次在同一地点取得了长达 38.69m 的柱状样,而 1999 年的 ODP 184 航次又在该站钻探 450m,代表约 100 万年来的地层记录,为较长时期序列的高分辨率地层学研究提供了基础。

3 古海洋学参数的研究

3.1 海水表层温度(SST)

南海古水温的定量测算,始自最适温度法,即参照太平洋各种现生浮游有孔虫的最适生存温度,按在化石群中的丰度加权平均取得年平均温度^[13];接着使用转换函数法,选用 P. R. Thompson^[51]为北太平洋建立的 FP-12E 转换函数,用浮游有孔虫数据测算冬、夏平均温度^[16],发现末次冰期时南海北部冬季表层水温较全新世低 6℃ 以上,而夏季温度的差值在误差范围以内,说明冰期时季节性大为增强,反映了边缘海的放大效应^[17],改变了 CLIMAP^[52]认为该区表层水温在冰期旋回中很少变化的结论。与同纬度西太平洋开放海区对比,南海冰期冬季海水表层温度显著下降、季节温差增大,充分反映边缘海对冰期旋回的“放大效应”。同时,冰期的表层水温度场,又与计算机模拟的海流格局十分相似^[53]。

尽管 FP-12E 转换函数近年来一直是南海古水温测算中最广泛使用的方法^[2,54~56],但毕竟这是在北太平洋开放海域资料的基础上建立起来的,未始见得完全适用于南海这个边缘海;何况转换函数方法本身受到挑战,尤其在低纬海区应用时产生了许多矛盾^[28]。对此,基于有机地球化学分析的长链不饱和酮 U_{37}^k 比值,提供了独立的年平均古温度值,可以作为检验^[57]。南海 4 个柱状样运用 U_{37}^k 计算年平均表层水温的结果表明,冰期与间冰期温差在北部为 4~4.5℃,南部为 2.5℃,西赤道太平洋为 0.7℃^[55],有力地支持了南海冰期与间冰期温差远远超过同纬度开放海区的观点,且属“西太平洋暖池”的南沙海区亦不例外^[58]。

为了克服转换函数法某些弱点,近年来提出用“现代类比法(MAT)”处理浮游有孔虫数据,同样求取冬夏表层水温。用转换函数法、现代类比法和 U_{37}^k 3 种方法分析同一个南海柱状样,发现前两种方法大同小异,显示同样的变化趋势,而 U_{37}^k 则更加接近冬季温度^[59],虽然在别的站位有时也接近年平均温度^[46]。最近,在南海表层样品的分析基础上提出了专门适用于本海区的 SIMMAX 现代类比法^[60],为南海海水古温度,尤其是冬季温度提供了更好的测算途径。

事实上,上述测算表层水温的方法全部依靠浮游生物,而浮游生物生活的“表层水”有相当的厚度,无论浮游有孔虫或者钙质超微化石都有浅层水种和深层水种之分,前者生活在海水顶部的“混合层”内,后者生活在温跃层或者更深。两维空间的古海洋学只考虑表层水温,而所依据的浮游生物却分布在三维空间里,因此只有深入到三维空间的古海洋学,把表层水温与海水上层结构联结起来考虑,才能正确地取得古海洋学参数的信息。

3.2 海水上层结构

海水上层结构的核心问题是温跃层的深度。举例来说,上升流区温跃层浅,表层水温低;黑潮区则温跃层深,表层水温高。当温跃层变浅时,浅层水种减少、深层水种增多;变深时反之。这种变化在低纬海区尤为重要,因此提出了在赤道太平洋区依靠浮游有孔虫组成测算古温跃层深度的转换函数^[61]。用于南沙海区,已经发现近百余万年来温跃层波动在115~230m之间,冰期时变浅、间冰期加深,说明冰期旋回中西太平洋暖池区海水上层结构的变化比表层水温变化更为显著¹⁾。相反,南海南部越南岸外的分析,却发现温跃层冰期时深、间冰期浅,推测系间冰期时夏季风驱使上升流加强所致²⁾。

与浮游有孔虫相似,钙质超微化石组合对海水上层结构的变化同样灵敏。最为显著的是深层水种 *Florisphaera profunda* 的百分比值^[62],南沙海区该种比例在冰期下降、间冰期增高,反映了温跃层在冰期结束以后的加深^[58]。

此外,浅层与深层水种之间的同位素差值,也可以指示海水上层结构的变化,其中尤以碳同位素($\Delta\delta^{13}\text{C}$)更加灵敏,在南海北部的地层中已有实例^[63]。

3.3 深部水团

三维空间的古海洋学,还应当包括深层水的历史变化。同样,化石群成分和壳体稳定同位素是水团的灵敏标志,但这里需要依据底栖生物,主要是底栖有孔虫。举例来说,南海现代水层结构在300~1000m为中层水,1000~2500m为深层水,2500m以下为盆地水。由于巴士海峡有水深2500m的海槛阻隔,西太平洋水深>2500m以含底栖有孔虫 *Favocassidulina fava* 为特征的底层水不能进入南海。但是在末次盛冰期前,*F. fava* 却出现在南海水深2100m以深的一些柱状样沉积中,表明南海和西太平洋在末次盛冰期前,深层水/盆地水的界线要比现代浅500m左右(图4a),而末次盛冰期时由于“北太平洋深层水”形成,使盆地水的顶面下压到2500m以下(图4b)^[64,65]。

底栖有孔虫的氧、碳稳定同位素变化,同样可以揭示深部水团的演变。南海9个取自不同水深的柱状样中,以 *Cibicidoides wuellerstorfi* 为主的底栖有孔虫同位素测定表明,末次盛冰期时深部水的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 垂直梯度较全新世明显增大,并存在深约2000m的深温跃层和深营养跃层,在1000~2500m深处可能存在温度较低、盐度偏高、垂直流通良好而富含 ^{13}C 的“北太平洋深层水”^[66]。

1) Jian Z, Wang P, Chen M-P *et al.* Foraminiferal responses to major Pleistocene paleoceanographic changes in the South China Sea. 1999

2) 黄宝琦, 葛知潜. 越南岸外晚第四纪上升流与东亚夏季风变迁. 见本期518~525页

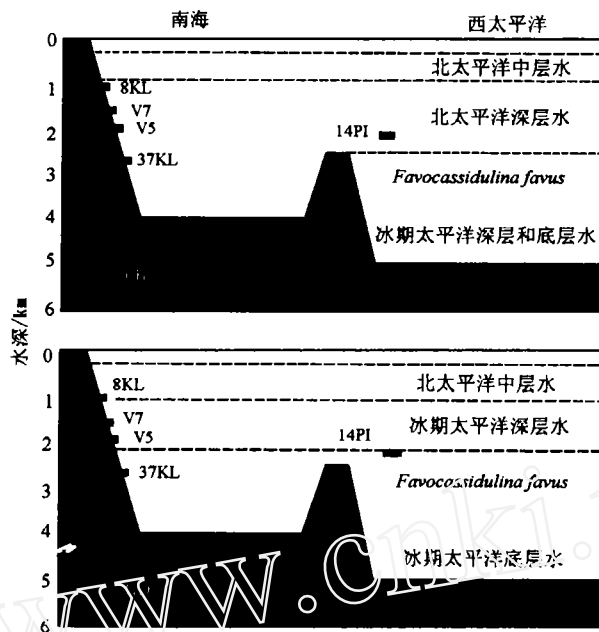


图 4 南海和西太平洋深部水团垂直分布模式变化示意图^[64,65]

(a) 末次盛冰期以前的模式(太平洋深层水模式) (b) 末次盛冰期时的模式(北太平洋深层水模式)

图中 8KL, V5, V7, 37KL 和 14PI 分别是柱状样 SO49-8KL, V35-05, V36-07, SO50-37KL 和 KT84-14PI 的缩写
Fig.4 Simplified modes of bathymetric distribution of deep-water masses in the South China Sea and western Pacific (from [64, 65])

南海深部水团的研究虽然早在 12 年前就已经开始^[67], 提出过冰期时形成“北太平洋深层水”影响南海的可能, 但直到近年来才取得以上所述的进一步证据。这些推论尚属初步, 离取得结论还有很长的距离; 但由于冰期“北太平洋深层水”是否存在, 是牵涉到“大洋传送带”^[68]冰期时曾否倒转, 现代由大西洋流向太平洋的深部洋流在冰期时有无根本变化的全球性问题, 值得给以特殊的注意。

3.4 表层生产力

海洋表层生产力的变化, 既以“生物泵”效应而涉及全球碳循环, 又可因上升流驱动而反映风向和强度, 在古海洋学中的重要性日益显著。南海晚第四纪古生产力的研究虽已多年^[23,25,69], 大量的成果则是在最近两三年内涌现的。有孔虫壳体的碳同位素^[46], 底栖有孔虫组合^[70,71], 有孔虫壳体的 Cd/Ca 值^[72]以及有机碳、长链不饱和酮和蛋白质^[59,73]含量等, 均被用来指示表层生产力的变化。研究结果普遍揭示出冰期旋回中生产力的显著变化, 如南海南部海区末次冰期时表层生产力约为全新世的 1.6 倍^[73], 但是越南以东的海面由于夏季上升流的作用, 间冰期的生产力一般反而高于冰期¹⁾。研究表明, 底栖有孔虫的组合

1) 黄宝琦, 葛知焜. 越南岸外晚第四纪上升流与东亚夏季风变迁. 见本期 518~525 页

随着有机碳通量而变化,从而反映表层生产力的升降。在南海南部,最高生产力出现于盛冰期,而南海北部却出现于冰消期内即全新世初期^[70,71],相信这与在冰期旋回中随海平面升降河流输入营养元素的数量变化相关。

4 气候变化与古季风

地理位置决定了南海在海气交换和东亚季风系统中的重要性。10余年来的古海洋研究已经在不同时间尺度上显示出南海沉积中蕴藏着丰富的古气候,特别是古季风的信息。

4.1 规道尺度上的气候变化

前面说过,南海南北都发现表层海水冰期时冬季温度较间冰期显著下降,而夏季温度相当稳定,因此季节温差在冰期时加剧。从南沙 17957 柱状样的浮游有孔虫转换函数古温度看,这种冰期与间冰期的差异一百万年来始终存在¹⁾。南海冰期时冬季温度下降幅度远远超过同纬度开放大洋区^[17,74],其原因可以从大洋与大气两方面去找:前者是北太平洋极锋南移,温带水通过巴士海峡进入南海^[17],而且黑潮途径东移,难以影响南海;后者是冰期时冬季风加强,造成冬季水温下降^[45]。可能两者都起作用,但从下面的讨论可以看出冰期冬季风强化对南海地区的气候有广泛影响。

深海沉积中保存的陆地气候直接标志,主要是陆源碎屑矿物和花粉。陆源碎屑物的粒度分析表明,全新世以河流搬运为主,冰期时以风力搬运占优势,反映冬季风强化,而冰后期夏季风使河流流量加大、泥沙输出增多。具体说来,王律江等^[46]对南海 4 个柱状样沉积物进行去 CaCO_3 和去有机碳后的 $< 63\mu\text{m}$ 细颗粒粒度分析,区分出 $< 6\mu\text{m}$ 的粘土级和 $> 6\mu\text{m}$ 的粉砂级两大类,前者以河流输出沉积物为主,后者为风尘沉积物为主,两者含量变化指示季风的盛衰。在南海北部柱状样中,河流输出物百分含量变化大体与 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线平行,末次盛冰期为 50%~55%,全新世为 70%~75%,其中全新世早期最高 ($> 75\%$),反映夏季风在全新世显著增强、降雨量大增,致使河流输入物明显增多,尤其在全新世早期夏季风最为强盛。有趣的是由夏季风造成的河流冲积物增多,早于反映冰期以后海面上升开始的 $\delta^{18}\text{O}$ 信号约 3 500 年,而反映冬季风减弱的风尘沉积突然变少,却发生在日历年 11 000 年前,两者相比,可能说明东亚夏季风与南极冰盖的关系密切,而冬季风却与北极冰盖更为相关^[45]。

孢粉是反映季风气候最直接的证据。南海 17940 柱状样孢粉的高分辨率分析首次揭示了末次冰期时北部陆架发育草原植被及高山针叶林曾大规模南迁,表明南海北部末次冰期时气温和湿度的大幅度下降^{[40,75] 1)}。这个结论与用浮游有孔虫计算出的末次冰期海水表层温度显著下降相吻合^[28,54,55,74,76]。南海近三四万年来的记录不仅反映了冰期-间冰期的变化,而且显示出南、北海区在冰期时的气候反差。东北部的 17940 柱状样冰期花粉谱与全新世的截然不同,蒿属 (*Artemisia*) 等草本植物花粉大量出现,而且有云杉 (*Picea*)、冷杉 (*Abies*) 等高山针叶树的花粉,伴有天然火灾产生的碳屑,指示温度和湿度

1) Jian Z, Wang P, Chen M-P *et al.* Foraminiferal responses to major Pleistocene paleoceanographic changes in the South China Sea. 1999

的大幅度下降^[40,75]。而在南海南部的 17964 柱状样(6°10' N, 112°13' E, 水深 1 556m, 柱长 13.04m)和 17962 柱状样(7°11' N, 112°05' E, 水深 1 970m, 柱长 14.80m), 冰期和全新世的花粉组合并无重大差异, 均含大量热带低地雨林花粉, 说明冰期时也相当温暖潮湿¹⁾。冰期时如此强烈的南北反差, 正好反映了冬季风加强, 穿过中国大陆的北风使南海北部陆架温度和雨量显著下降, 而穿过南海水面以后却给南海南部带来水分, 使南部保持暖湿环境。已经证明, 这些花粉主要来自冰期低海面出露的陆架和邻近的陆地, 南海深海沉积第一次揭示了冰期时南海北部陆架曾有草原植被发育, 而南部陆架为雨林覆盖²⁾。

海岸上升流是季风气候的重要海洋学标志。尽管南海古上升流的记录似乎不及印度洋显著, 冰期旋回中上升流盛衰的历史已见端倪。现代由于艾克曼(Ekman)效应, 南海西侧发育夏季风驱动的上升流、东侧发育冬季风上升流。因此, 可以通过冰期旋回中上升流的发育和变化来追踪古季风的信息。如王律江等^[46]通过对南海末次盛冰期 15 000~20 000aB.P. $\delta^{13}\text{C}$ 值平面分布的分析, 揭示了吕宋岛北端岸外存在一个 $\delta^{13}\text{C}$ 低值的富营养区, 反映当时由强劲冬季风驱动上升流的形成。翦知酒等^[71,77]和 W. Kuhnt 等^[70]对南海南部 17964 和北部 17940 两个柱状样中底栖有孔虫、有机碳和 $\delta^{13}\text{C}$ 的对比研究表明, 末次盛冰期冬季风加强, 在南海南部形成上升流, 加上低海面其他陆架输入陆源物质的增多, 导致表层的高生产力; 在冰盛期后, 南海冬季风减弱, 夏季风增强并在全新世早期最盛, 在南海北部形成上升流, 加上夏季风降雨量导致河流输入的营养物增多, 使南海北部表层生产力显著增高。黄宝琦等³⁾对位于越南岸外现代上升流区的 17954-3 柱状样(14°47.7' N, 111°31.5' E, 水深 1 515m, 柱长 11.49m)浮游有孔虫研究证明, 该区在间冰期, 尤其末次间冰期时呈现表层温度低、温跃层浅、生产力高等现象, 认为是由夏季风所驱动的上升流造成。该区研究还表明, 上升流在氧同位素 5 期最强盛, 向全新世逐渐减弱。这种夏季风从氧同位素 5 期开始逐渐变弱的趋势也反映在黄土磁化率记录中^[78,79]。

4.2 冰期旋回的“转型”

第四纪较长序列的深海地层剖面中, 普遍发现冰期旋回在更新世中期发生转折: 从小幅度高频率(40 000a周期)的旋回变为大幅度低频率(0.1Ma 周期), 转折的时间在 0.9Ma B.P.。这次“中更新世转折”或者“中更新世革命”^[80]反映了北半球冰盖的重大变化, 具有广泛的气候影响, 然而其变化的性质和机理至今尚无定论^[81]。

南沙海区的 17957 站, 在中国海域首次反映了这次“转型”, $\delta^{18}\text{O}$ 第 22 期初(0.9Ma B.P.)由 40 000a周期转为 0.1Ma 周期, 冬季表层水温升高, 温跃层变浅, 有孔虫溶解程度加深, 各项数据的冰期-间冰期反差加大, 而放射虫丰度也明显增多, 成为更新世环境变化中的最大转折点(见图 2)。

南沙海区另一次重大变化发生在 $\delta^{18}\text{O}$ 5 期前, 冬季水温再度降低、温跃层加深, 浮游有孔虫组合也发生重大变化⁴⁾。此次变化在陆架海区也有强烈反应, 我国沿海的大规模海

1) 李 进, 孙湘君. 南海南部末次冰期以来的孢粉记录及其气候意义. 见本期 526~535 页

2) 孙湘君面告

3) 黄宝琦, 翦知酒. 越南岸外晚第四纪上升流与东亚夏季风变迁. 见本期 518~525 页

4) 李保华. 南沙海区晚第四纪浮游有孔虫演化及其古海洋学意义

侵可能由此开始。由于目前资料尚嫌不足,特别是陆架与沿岸区缺乏确切的年龄依据,此次事件的性质、时间和原因有待进一步工作核实。

4.3 千年和百年尺度的气候变化

南海最早发现的“亚规道”事件是“新仙女木期”。虽然根据冰期到全新世沉积速率和有孔虫丰度上的突然变化,早在 1988 年就曾否定过新仙女木期在南海的存在^[4],而更多柱状样的分析都提供了新仙女木期在南海和西太平洋边缘海广泛出现的证据^[82]。接着南海又发现了一系列的千年等级的亚规道准周期事件。17940 柱状样的孢粉分析揭示了末次冰期蒿属为主的草原与高山针叶林频繁交替出现,反映南海北部末次冰期在大幅度降温、降湿的背景下,气候存在相对温干和冷湿的交替千年级准周期,并首次在南海识别出 Heinrich 事件^[83]。谱分析的结果,发现有 6 750a 和 2 900 / 2 100a 的两类准周期,可能分别与 Heinrich 事件和 D/O 事件相当¹⁾。同一柱状样的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线在氧同位素 3 期时也呈现出明显的波动,这些波动事件几乎都可以与格陵兰冰芯的记录相比,如 1 260~1 230cm 层段 $\delta^{18}\text{O}$ 出现负值高峰,盐度下降,同时陆源物粒度分析表明风尘减少,粘土增多,反映出暖湿气候与冰芯中 D/O 事件 8 相对应。同样道理,可以在 17940 柱状样新仙女木期以下岩芯找到相当于冰芯中 D/O 事件 1~10 的历次记录,说明北大西洋与南海在千年尺度气候变化上的遥相关^[45,46]。

千年等级的事件也在南海南部发现。最近 MD 972151 柱状样(8°43.7' N, 109°52.2' E, 水深 1 598m, 柱长 26.72m) 15 万年的记录中,不仅有新仙女木期的清晰反映,碳酸盐含量和 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线还分别与北大西洋的 D/O 事件和 Heinrich 事件相对比^[48,84],进一步显示“亚规道”事件在南海的普遍性。

除去冰期的千年等级事件外,南海也有百年尺度的季风波动记录。17940 柱状样全新世的氧同位素曲线显示出频繁而强烈的变化,波动幅度常达 0.7‰,甚至 1.0‰。由于全新世期间极地冰盖基本稳定, $\delta^{18}\text{O}$ 的波动只能是温度或盐度的变化引起,而该站 U_{37}^k 的分析说明全新世表层海水温度并无明显变化,因此 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化主要反映盐度升降。运用浮游有孔虫及其同位素分析方法求取表层水古盐度,表明全新世该区确有 1‰~2‰ 的波动,应是夏季风盛衰导致降水和河流排水量的变化,与全新世地层中所记录的 $\delta^{18}\text{O}$ 变化同样反映了夏季风的强弱。氧同位素曲线的谱分析结果指示 775a 以及 102 和 84a 的周期,可能是全新世东亚季风变化的某种规律性^[45,46]。

5 深海沉积作用与突发事件

南海的沉积学研究已经取得大量成果,而与古海洋学密切相关的深海沉积学研究却正待开展。与上述其它领域一样,近年来南海在深海沉积过程、沉积速率、突然沉积事件诸方面都有长足的进步,而深海碳酸盐旋回方面的进展尤为可观。有关南海 15 万年来的沉积作用,我们在 4 年前已有综述,归纳过表层沉积、浅地层剖面和沉积速率、沉积搬运方面的内容^[28],此处不再重复,只拟就最近的进展加以补充。

1) 罗运利,孙湘君. 南海深海沉积物花粉记录的快速气候波动事件. 见本期 536~540 页

5.1 沉积通量

沉积物捕集器是研究现代过程、测定沉积通量的有效手段,对于识别季风气候下沉积作用的季节性更为重要。自 1987 年 9 月起分别在南海北部(18°47' N, 116°02' E, 水深 3 750m)和中部(14°06' N, 115°16' E, 水深 4 310m)两站位的不同水深处布置时间系列沉积物捕集器,每 15~31 天自动收集一次,对颗粒物通量、组成和来源及其变化进行观察,研究南海生物和生物化学循环及其与季风气候的关系。其资料虽尚在陆续发表中,但已取得重要成果^[85~89]。

1987 年 9 月至 1995 年 5 月的资料揭示,南海北部与中部浅水(水深 1 000~1 235m)的平均颗粒物通量大致相当[79.7~91.6mg/(m²·d)];多数情况下,季风时期的通量高于季风间期^[86,88,89]。颗粒有机碳及由此估算的生产力同样也在季风时期高,季风间期低。不过北部在冬季风、中部在夏季风时期增高的趋势更加明显,即中部夏季较高生产力与夏季风驱动的上升流密切相关^[87,88]。这种颗粒物通量和生产力在季风时期增高的现象,在某种程度上解释了南海在冰期旋回中生产力与季风的关系^[86,87]。

从颗粒物组成上看,北部颗粒物主要由 CaCO₃和岩源物质组成,其平均丰度占整个通量的 90% 以上^[85]。其中岩源物质高值发生在冬季风时期,此时珠江径流量最小,而且河流输入的陆源物质在海流作用下主要沿内陆架向西搬运,加上岩源物质以石英和长石为主明显不同于河流输入的陆源物质。据此, M.G. Wiesner 等提出岩源物质中大部分属风源的观点^[87];风源之外,岩源物质在冬季也可能是随海流经由台湾海峡或巴士海峡进入南海北部^[87,89]。

南海中部颗粒物在组成上明显不同于北部,以 CaCO₃和生物硅占优势。生物硅平均含量高出于北部(1.4%)一个数量级^[89]。夏、冬季风时期分别在越南东南岸外和南海东南部产生的上升流被认为是造成南海中部硅质生物(硅藻和硅鞭藻为主)通量高的主要原因^[87,89]。

颗粒物通量垂向分布的资料表明, CaCO₃和有机碳通量随水深而减少是普遍的现象,与 CaCO₃溶解作用和有机物质的降解作用随水深加强相关。但岩源物质和生物硅两者的通量常常出现相反的趋势,深水处的通量显著高于浅水处,这在南海中部最为明显。目前把此种现象归因于深部水侧向流动的结果^[87,89]。

5.2 沉积速率和沉积搬运

根据水深超过 100m 的 72 个沉积柱状样统计,南海末次冰期时的平均沉积速率总量(167 × 10⁶t/a)明显高于冰后期(92 × 10⁶t/a),而差异主要在于陆源碎屑物的急剧增加^[90],前人根据少量资料所作南海冰期时沉积速率增加不大的推论^[26]与统计结果不符。现代南海的沉积物来源中,北部陆坡的陆源物比例较南部高得多,这也反映在表层沉积物中来自陆地的花粉浓度和输入的有机物含量上:南部陆坡的花粉浓度只及北部的 1/10^[39,91],而来自陆地高等植物的有机物含量也由南向北递增^[92]。与此相应,南海各深海区中以北部陆坡区的全新世总堆积速率最高,平均达 13.3g/(cm²·10³a),南部陆坡区仅 6.4g/(cm²·10³a);而末次冰期时南部陆坡高达 17.9g/(cm²·10³a),远在北部陆坡[13.7g/(cm²·10³a)]之上。变

化的原因是南部陆坡在冰期低海面时成陆的巽他陆架有大河(古巽他河)注入,湄公河也直接流入深海区,带来大量的陆源物质^[90]。

表 3 南海深水区(>100m)末次冰期($\delta^{18}\text{O}$ 2期)和全新世($\delta^{18}\text{O}$ 1期)的年平均沉积量/ $10^6\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[90]

Table 3 The mean deposit volume per year in the last glaciation ($\delta^{18}\text{O}$ stage 2) and Holocene ($\delta^{18}\text{O}$ stage 1) in deep-water areas of the South China Sea / $10^6\text{t}\cdot\text{a}^{-1}$ ^[90]

$\delta^{18}\text{O}$ 分期	沉积总量	陆源碎屑沉积量	碳酸盐沉积量	蛋白石沉积量
1	92.0	79.4	21.9	4.6
2	167.4	155.6	22.4	13.3

近年来的研究表明:南海的陆源沉积物的源区不限于南海,十分可能有外源通过海峡输入。从表层沉积物中花粉分布来看,最高浓度出现在台湾海峡及巴士海峡入口处,向西南方向递减^[39,91];而表层沉积物中浮游有孔虫 *Globigerinoides ruber* 壳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值呈同样分布格局,从巴士海峡区向西变重^[46]。两者同样指示有富含营养成分和陆源花粉的水流自东北角进入南海。同时,捕集器记录也显示陆源物通量最高值出现在 11 月到 1 月东北方向冬季风盛行时^[85]。说明很可能冬季风将南海以外的富陆源物海流送入本区,反映了季风对南海深海沉积过程的影响。

微体化石指示沉积搬运作用的又一例证来自介形虫。南海深海表层沉积中常见有陆架浅海介形虫壳瓣出现,此类异地埋葬的壳瓣集中分布在北部陆坡,反映有沉积物连带壳瓣从陆架向陆坡搬运^[38]。南海沉积物的顺坡搬运对于深海沉积物分布至关重要。如深海盆的红粘土与大洋相比沉积速率高一个数量级,其来源便是顺坡搬运作用,其中以浊流作用尤为关键。触发此类搬运作用的机制颇多,而海平面变化时造成的搬运最为强烈,从南海已有资料看,约 13 000a.B.P. 前曾发生规模巨大的顺坡搬运。同时,此类搬运北部较南部强烈,致使北部陆坡上段的沉积厚度较下段为小^[28]。南海的顺坡搬运也可以“雾状层”的形态发生,搬运的沉积颗粒极细,并不破坏地层层序。南海东北的 17940 站全新世沉积速率高达 $65\text{cm}/10^3\text{a}$,最近 ODP 184 航次的钻探又表明该站一百万年来的平均沉积速率保持在 $45\text{cm}/10^3\text{a}$ 的高值,远远高于南海陆坡的一般速率,推测与此类作用有关。地震剖面也揭示该站处在一个具深海沉积波特征的堆积体上,为高沉积速率创造了条件。

5.3 碳酸盐旋回

深海碳酸盐旋回是南海古海洋学诸多课题中研究最早、应用最广和成果最多的一个,有关研究历史、溶解作用特征、碳酸盐旋回类型及其成因等问题,4 年前曾作过归纳^[28],关于碳酸盐地层学的应用前文也已有过讨论,此次只对近年来的进展作简单介绍。

南海第四纪古海洋学的一个重要特点,便是其两类不同性质的碳酸盐旋回:溶跃面之上为“大西洋旋回”, CaCO_3 曲线大体与 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线平行;溶跃面之下属“太平洋旋回”, $\delta^{18}\text{O}$ 第 1, 2 期时几乎与 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线相反^[25,93,94]。然而,仔细分析碳酸盐溶解作用的各项指标(浮游有孔虫抗溶种比例、碎壳率、底栖有孔虫比例、胶结壳比例等),发现这两类旋回在碳酸盐溶解作用的变化趋势上并无区别,同样反映出“太平洋旋回”,只是溶解作用的表现程度不一,在溶跃面以上影响较弱,而被陆源物输入的“稀释作用”压倒,出现“大西洋旋

回”^[2,28]。这种“太平洋型”的溶解作用并不简单地随冰期旋回而增减,比如在 $\delta^{18}\text{O}$ 第4/5期时最强^[99],而末次冰消期约12 000a.B.P.时最弱^[95]。南沙百余万年的第四纪沉积序列中,同样显示出与太平洋相一致的溶解事件^{[44] 1)}。

包括南海在内的太平洋碳酸盐溶解作用变化,不仅表现为上述方解石补偿深度(CCD)的升降,同时也反映为文石补偿深度(ACD)相同趋势的变动。分析文石质的翼足类壳体保存状况,发现冰期时的ACD深逾2 000m,比全新世(约1 000m)深得多^[35,36]。由此可见,碳酸盐旋回反映的是整个水柱化学性质的变化,影响十分广泛。

在溶跃面之上以 CaCO_3 表征的碳酸盐旋回主要反映陆源物输入量的变化,因而对冰期旋回中海平面升降具有很高的灵敏度, CaCO_3 曲线与 $\delta^{18}\text{O}$ 曲线十分接近,不仅可以用于冰期旋回中的地层划分,而且可以反映亚轨道事件^[48]。同时, CaCO_3 在平面里的变化梯度也与海面升降密切相关,如南沙海区不同站位的 CaCO_3 与纬度几乎呈线性关系,朝南向盆地边缘递减;而冰期时海面下降,其变化梯度显著增加,不仅指示了海岸的逼近,而且反映出当时陆地的湿热环境,使溶解作用加强^[94]。

总之,南海碳酸盐含量的垂向和横向变化蕴含着非常丰富的古环境信息,并且涉及大洋环流和全球碳循环的重大问题,亟待进一步深入研究和专文评述。

5.4 微玻陨石与火山活动

南海深海地层突发性事件的记录有微玻陨石和火山灰。微玻陨石首先发现于17957柱^[45],接着也见于17959(11° 08' N, 115° 17' E, 水深1 957, 柱长13.93m)和ODP 772(16° 39', 119° 42', 水深1 530m, 井深136.2m)两柱²⁾。根据17957站古地磁和氧同位素分析资料,微玻陨石丰度的高值峰位于 $\delta^{18}\text{O}$ 19/20界线附近,其沉积的年代要早于布容/松山界线的年龄(0.788MaB.P.)^[44]。南海的微玻陨石是0.8MaB.P.发生的地外物体撞击事件的产物,撞击事件所造成的澳-亚群玻陨石散落区面积占全球的1/10左右^[96]。这次撞击事件对环境的影响至今尚不十分清楚,但其产物(玻陨石)广泛地分布在西太平洋、印度洋和澳大利亚、东南亚及我国黄土中,是确定所在沉积物年代和地层对比的可靠标志。

南海东缘以琉球-台湾-菲律宾火山地震带为邻,南侧有印尼巽他火山地震带。因而,在南海深海沉积中广泛分布火山灰,在硅质物质中尤占重要地位。如对中部SO50-91KL柱(14° 38' N, 115° 07' E, 水深4 282m) 770cm长的柱状样作硅质颗粒分析,在72个样品中都含有火山灰,其中76%样品中火山灰含量大于20%,40%样品中大于50%^[97]。目前已经在南海晚第四纪沉积中发现了若干火山灰层^[27,28,84,98],但总的来说,对火山灰层的数量、层序及其各自的物理、化学特征尚不十分清楚,有待大力开展研究。

火山灰对环境的影响已引起人们的关注。菲律宾Pinatubo在1991年6月15日发生本世纪最大的火山爆发之一,降落的火山灰呈扇形分布在整个南海中部海底,面积达37万平方公里,其厚度在菲律宾岸外海区大于5cm。南海中部距火山586km之远水深1 190m和3 730m的两个沉积物捕获集器,在爆发后的3天内就接收到火山灰。据统计,

1) Jian Z, Wang P, Chen M-P *et al.* Foraminiferal responses to major Pleistocene paleoceanographic changes in the South China Sea. 1999

2) 王汝建和王吉良面告

火山灰通量是火山爆发前颗粒物总通量的 200~300 倍; 火山灰在该站位的堆积率达 $9\text{kg}/\text{m}^2$ ^[87,99]。如此大量的火山灰降落对南海环境的影响, 正是在跟踪调查的一个课题。据南海中部捕集器的资料, 火山爆发后 1992 年 3 月至 1993 年 5 月, 生物蛋白石的通量比火山爆发前明显增加, CaCO_3 /生物蛋白石值下降; 但之后这个指标又恢复到火山爆发前的水平^[87]。由于不清楚南海生物蛋白石的正常背景值, 很难断定这些变化是由火山灰造成的, 或者是在自然变化范围之内。然而, 火山爆发对南海东部地区的底栖有孔虫却是灾难性的, 造成集群死亡。火山爆发 3 年后的跟踪调查表明, 该区底栖有孔虫群落结构远没有恢复火山爆发前的原貌^[100]。ODP 184 航次在各个钻孔中都发现了许多火山灰层, 查明火山爆发对生物和沉积的影响无疑在南海第四纪古海洋学研究中有重大意义。

6 结语

以上试图从几个主要方面, 对南海古海洋学在近年来的进展作一综述。在古环境研究向地球系统科学迈进的世纪之交, 将地球表面各大圈层联系起来探讨内在关系的要求日益迫切, 而在我国的第四纪研究中, 海洋、特别是深海部分还只是个“新兵”。我们为取得的进展而高兴, 但是更为重大的差距而焦虑。目前, 南海的古海洋学研究的洪炉已经升温, 新世纪初应当是生出突破性成果的时期。展望下一步的工作, 至少可以指出几个值得特殊注意的方向。

(1) 海陆对比和相互作用, 是南海古环境研究的优势和重点。要从海、陆事件序列的简单比较, 在高分辨率年代学基础上推进到事件的超前滞后和因果关系上来; 从现象描述推进到机理探索上来。

(2) 三维空间的古海洋学探索, 是揭示深层次古环境变化机理的重要途径。上层海水结构的研究, 可以回答单靠表层海水温度无法解决的问题; 深部海水历史与表层的耦合, 将能开拓研究长周期、大范围变化机制的新领域。

(3) 要突出低纬度边缘海的特色, 从全球的高度探讨南海第四纪古海洋学的问题。南海是界于当今世界最大的大陆与大洋间最大的一个边缘海, 其南北又分属“西太平洋暖池”区和亚热带海区, 在全球气候系统中占有特殊地位。南海的古环境研究面临着许多全球性的课题。只有“立足南海, 放眼世界”, 才能由小见大、击中要害。

(4) 不能局限于晚第四纪的研究, 应当向更早的地层序列推进。目前南海古海洋学绝大部分成果出自晚第四纪, 随着大洋钻探样品的取得, 可以追踪更早时期的古环境历史, 进而探讨构造与气候关系一类的重大问题。

致谢 本文承翦知滔提供资料和宝贵意见, 孙湘君、王汝建和黄宝琦提供帮助, 作者在此深表感谢。

参 考 文 献

- 1 丁一汇, 李崇银主编. 南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用. 北京: 气象出版社, 1999. 423
- 2 Wang P, Wang L, Bian Y *et al.* Late Quaternary paleoceanography of the South China Sea: Surface circulation and carbonate cycles. *Marine Geology*, 1995, 127:145~165

- 3 Andree M, Oeschger H, Broecker W S *et al.* AMS radiocarbon dates on foraminifera from deep sea sediments. *Radiocarbon*, 1986, 28(2A):424~428
- 4 Broecker W S, Andree M, Klas M *et al.* New evidence from the South China Sea for an abrupt termination of the last glacial period. *Nature*, 1988, 333:156~158
- 5 郑执中,郑守仪. 南海北部的浮游有孔虫. 海洋与湖沼, 1964, 6(1):38~84
- 6 Chen M P, Chen J C. Chemical variations of planktonic foraminifera in deep-sea core V19-134, the South China Sea. *Acta Oceanographica Taiwanica*, 1973, 3:97~116
- 7 Chen M P, Shieh K-S. Recent nannofossil assemblages in sediments from Sunda Shelf to abyssal plain, South China Sea. *Proceedings Nature Science Council, Taipei*, 1982, Part A, 6:250~285
- 8 蔡慧梅,涂震. 南海西沙、中沙群岛表层沉积物中有孔虫、介形虫分布. 南海海洋科学集刊, 1983, 4:25~63
- 9 Rottman M L. Dissolution of planktonic foraminifera and pteropods in South China Sea sediments. *Journal of Foraminifera Research*, 1979, 9(1):41~49
- 10 涂震. 南海中部海区浮游有孔虫的溶解-碳酸盐溶解作用初探. 热带海洋, 1984, 3(4):18~23
- 11 秦国权. 南海北部新生代晚期圆扁虫旋卷方向的地层意义. 见:汪品先等. 海洋微体古生物论文集. 北京:海洋出版社, 1980. 164~171
- 12 汪品先,何炎,胡兰英等. 有孔虫. 南海北部大陆架第三纪古生物图册. 广州:广东科学技术出版社, 1981. 83~137
- 13 汪品先,闵秋宝,卞云华等. 十三万年来南海北部陆坡的浮游有孔虫及其古海洋学意义. 地质学报, 1986, 60(3):215~225
- 14 Wang C-H, Chen M P, Lo S C. Stable isotope records of Late Pleistocene sediments from the South China Sea. *Bulletin of the Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taipei*, 1986, 6:185~195
- 15 何起祥,张明书. 中国西沙礁相地质. 北京:科学出版社, 1986. 117
- 16 王律江,汪品先. 用转换函数法推算南海古温度的尝试. 科学通报, 1988, 33(5):371~373
- 17 Wang L, Wang P. Late Quaternary paleoceanography of the South China Sea: Glacialinterglacial contrasts in an enclosed basin. *Paleoceanography*, 1990, 5(1):77~90
- 18 MOTE (Multidisciplinary Oceanographic Expedition Team of Academic Sinica to the Nansha Islands). Quaternary Biological Groups of the Nansha Islands and the Neighboring Waters. Guangzhou: Zhongshan University Publishing House, 1991. 552
- 19 中国科学院南沙综合科学考察队. 南沙群岛及其邻近海区沉积图集. 武汉:湖北科学技术出版社, 1993. 94
- 20 中国科学院南沙综合科学考察队. 南沙群岛及其邻近海区第四纪沉积地质学. 武汉:湖北科学技术出版社, 1993. 383
- 21 冯文科,薛万俊,杨达源. 南海北部晚第四纪地质环境. 广州:广东科学技术出版社, 1988. 1~261
- 22 郝诒纯等. 西沙北海槽第四纪微体古生物群及其地质意义. 武汉:中国地质大学出版社, 1989. 1~223
- 23 业治铮,汪品先. 南海晚第四纪古海洋学研究. 青岛:青岛海洋大学出版社, 1992. 1~324
- 24 郑连福,陈文斌. 南海海洋沉积作用过程与地球化学研究. 北京:海洋出版社, 1993. 1~201
- 25 Thunell R C, Miao Q, Calvert S E *et al.* Glacial-Holocene biogenic sedimentation patterns in the South China Sea: Productivity variations and surface water pCO_2 . *Paleoceanography*, 1992, 7:143~162
- 26 Schönfeld J, Kudrass H-R. Hemipelagic sediment accumulation rates in the South China Sea related to late Quaternary sea-level changes. *Quaternary Research*, 1993, 40:368~379
- 27 Sarnthein M, Pflaumann U, Wang P *et al.* Preliminary Report on Sonne-95 Cruise "Monitor Monsoon" to the South China Sea. *Reports, Geologisch-Paläontologisches Institut der Universität Kiel*, 1994, 68:1~125
- 28 汪品先等. 十五万年来的南海. 上海:同济大学出版社, 1995. 184
- 29 Wang P ed. Marine micropaleontology in China. *Marine Micropaleontology*, Special Issue, 1997, 32(1~2): 1~207
- 30 Sarnthein M, Wang P eds. Response of West Pacific Marginal Seas to global climate change. *Marine*

- Geology*, Special Issue, 1999, **156**(1~4):1~308
- 31 陈木宏, 谭智源. 南海中、北部晚沉积物中的放射虫. 北京: 科学出版社, 1996. 271
 - 32 王汝建, Abelmann A. 南海更新世的放射虫生物地层学. 中国科学(D辑), 1999, **29**(2):137~143
 - 33 兰东兆, 程兆第, 刘师成. 南海北部晚第四纪沉积硅藻. 北京: 海洋出版社, 1995. 138
 - 34 Mao S, Harland R. Quaternary organic-walled dinoflagellate cysts from the South China Sea and their paleoclimatic significance. *Palynology*, 1993, **17**:47~65
 - 35 王律江. 晚第四纪南海北部翼足类古生态与文石补偿深度. 南海晚第四纪古海洋学研究. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1992. 249~260
 - 36 Wang L, Jian Z, Chen J. Late Quaternary pteropods in the South China Sea: Carbonate preservation and paleoenvironmental variation. *Marine Micropaleontology*, 1997, **32**:115~126
 - 37 赵泉鸿, 郑连福. 南海表层沉积中深海介形虫分布. 海洋学报, 1996, **18**(1):61~72
 - 38 Zhou B, Zhao Q. Allochthonous ostracods in the South China Sea and their significance in indicating downslope sediment contamination. *Marine Geology*, 1999, **156**(1~4):187~195
 - 39 孙湘君, 李 逊. 南海现代花粉传播动力和途径在南海海域的差异. 中国科学(D辑), 1997, **27**(6):494~498
 - 40 Sun X, Li X. A pollen record of the last 37ka deep sea Core 17940 from the northern slope of the South China Sea. *Marine Geology*, 1999, **156**(1~4):227~244
 - 41 郑执中等. 南海东北部海区沉积物综合生态与拟生态. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1994. 175
 - 42 中国科学院南沙综合科学考察队. 南沙科学及其邻近海区晚第四纪的微生物与沉积环境. 北京: 海洋出版社, 1996. 210
 - 43 郝诒纯, 徐钰林, 许仕策等. 南海珠江口盆地第三纪微体古生物及古海洋学研究. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996. 136
 - 44 赵泉鸿, 葛知潜, 李保华等. 南沙深海沉积中的中更新世微玻璃石. 中国科学(D辑), 1999, **29**(1):45~49
 - 45 王律江, Sarnthein M. 南海北部陆坡近四万年的高分辨率古海洋学记录. 第四纪研究, 1999, (1):28~31
 - 46 Wang L, Sarnthein M, Erlenkeuser H *et al.* East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: High-resolution sediment records from the South China Sea. *Marine Geology*, 1999, **156**:245~284
 - 47 李学杰, 陈 芳, 唐荣革等. 南海北部 HY4-901 孔氧同位素与古气候研究. 科学通报, 1996, **41**(10):911~913
 - 48 Huang C-Y, Wang C-C, Zhao M. High-resolution carbonate stratigraphy of IMAGES Core MD972151 from South China Sea. *TAO*, 1999, **10**(1):225~238
 - 49 王保贵, 汤贤赞, 侯红明等. 南沙群岛海域磁性地层学初步研究. 热带海洋, 1993, **12**(2):53~60
 - 50 Lee T-Q. Last 160ka paleomagnetic directional secular variation record from Core MD972151, southwestern South China Sea. *TAO*, 1999, **10**(1):255~264
 - 51 Thompson P R. Planktonic foraminifera in the western North Pacific during the past 150 000 years: Comparison of modern and fossil assemblages. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1981, **35**:241~279
 - 52 CLIMAP Project Members. The surface of the ice-age earth. *Science*, 1976, **191**:1131~1137
 - 53 汪品先, 李荣凤. 末次冰期南海表层环流的数值模拟及其验证. 科学通报, 1995, **40**(1):51~53
 - 54 汪品先, 葛知潜, 刘志伟. 南沙海区盛冰期的气候问题. 第四纪研究, 1996, (3):193~201
 - 55 汪品先. 冰期旋回中西太平洋边缘海的季节性与暖池的多变性. 中国科学(D辑), 1998, **28**(1):1~6
 - 56 Miao Q, Thunell R, Anderson D M. Glacial-Holocene carbonate dissolution and sea surface temperatures in the South China and Sulu Seas. *Paleoceanography*, 1994, **9**:269~290
 - 57 Pelejero C, Grimalt J O, Sarnthein M *et al.* Molecular biomarker record of sea surface temperature and climatic change in the South China Sea during the last 140 000 years. *Marine Geology*, 1999, **156**:109~121
 - 58 Pelejero C, Grimalt J O. The correlation between the U_{37}^k index and sea surface temperature in the warm boundary: The South China Sea. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 1997, **61**:4789~4797
 - 59 Huang C-Y, Liew P-M, Zhao M *et al.* Deep sea and lake records of the Southeast Asian paleomonsoon for

- the last 25 thousand years. *Earth and Planetary Science Letter*, 1997, **146**:59~72
- 60 Pflaumann W, Jian Z. Modern distribution patterns of planktonic foraminifera in the South China Sea and West Pacific: A new transfer technique to estimate regional sea-surface temperatures. *Marine Geology*, 1999, **156**(1~4):41~83
- 61 Andreassen D J, Ravelo A C. Tropical Pacific Ocean thermocline depth reconstructions for the last glacial maximum. *Paleoceanography*, 1997, **12**(3):395~413
- 62 成鑫荣, 汪品先. 运用超微化石探索晚第四纪冲绳海槽上层海水垂向结构. 中国科学(D辑), 1998, **28**(2): 137~141
- 63 Huang C-Y, Wu S-F, Zhao M *et al.* Surface ocean monsoon climate variability in the South China Sea since the last glaciation. *Marine Micropaleontology*, 1997, **32**(1~2):71~94
- 64 葛知酒. 末次冰盛期西太平洋深水团的影响急剧增强. 科学通报, 1995, **40**(21): 183~186
- 65 Jian Z, Wang L. Late Quaternary benthic foraminifera and deep-water paleoceanography in the South China Sea. *Marine Micropaleontology*, 1997, **32**:127~154
- 66 葛知酒. 南海冰期深部水性质的稳定同位素证据. 中国科学(D辑), 1998, **28**(3): 250~256
- 67 Berger W H. Ocean ventilation during the last 12 000 years: Hypothesis of counterpoint deep water production. *Marine Geology*, 1987, **78**:1~10
- 68 Broecker W S, Denton G H. The role of ocean-atmosphere reorganizations in glacial cycles. *Quaternary Science Review*, 1993, **9**:305~341
- 69 Winn K, Zheng L, Erlenkeuser H *et al.* Oxygen / Carbon isotopes and paleo-productivity in the South China Sea during the past 110 000 years. In: Jin X *et al.* *Marine Geology and Geophysics of the South China Sea*. Beijing: China Ocean Press, 1992. 154~166
- 70 Kuhnt W, Hess S, Jian Z. Quantitative composition of benthic foraminiferal assemblages as a proxy indicator for organic carbon flux rates in the South China Sea. *Marine Geology*, 1999, **156**:123~157
- 71 Jian Z, Wang L, Kienast M *et al.* Benthic foraminiferal paleoceanography of the South China Sea over the last 40 000 years. *Marine Geology*, 1999, **156**:159~186
- 72 Lin H-L, Lai C-T, Ting H-C *et al.* Late Pleistocene nutrients and sea productivity in the South China Sea: A record of teleconnections with Northern hemisphere events. *Marine Geology*, 1999, **156**:197~210
- 73 房殿勇, 葛知酒, 汪品先. 南沙海区南部近 30ka 来的古生产力记录. 科学通报, 1998, **43**(8): 2 005~2 008
- 74 Wang P. Response of western Pacific marginal seas to glacial cycles: Paleoceanographic and sedimentological features. *Marine Geology*, 1999, **156**(1~4):5~39
- 75 孙湘君, 李 逊, 罗运利. 南海北部深海花粉记录的环境演变. 第四纪研究, 1999, (1): 18~26
- 76 汪品先. 西太平洋边缘海对我国冰期干旱化影响的初步探讨. 第四纪研究, 1995, (1): 32~42
- 77 葛知酒, 王律江, Kienast M. 南海晚第四纪表层古生产力与东亚季风变迁. 第四纪研究, 1999, (1): 32~40
- 78 李吉均, 方小敏. 青藏高原隆升与环境变化研究. 科学通报, 1998, **43**(15): 1 569~1 574
- 79 Guo Z, Liu T, Fedoroff N *et al.* Climate extremes in Loess of China coupled with the strength of deep-water formation in the North Atlantic. *Global and Planetary Change*, 1998, **18**:113~128
- 80 Berger W H, Bickert E, Jansen E *et al.* The central mystery of the Quaternary ice age. *Oceanus*, 1994, **36**(4):53~56
- 81 Clark P U, Pollard D. Origin of the middle Pleistocene transition by ice sheet erosion of regolith. *Paleoceanography*, 1998, **13**(1):1~9
- 82 汪品先, 卞云华, 李保华等. 西太平洋边缘海的“新仙女木”事件. 中国科学(D辑), 1996, **26**(5): 452~460
- 83 孙湘君. 南海深海花粉记录的环境演变. 见: 汪品先等. 十五万年来的南海. 上海: 同济大学出版社, 1995. 65~73
- 84 Lee M-Y, Wei K-Y, Chen K-Y. High resolution oxygen isotope stratigraphy for the last 150 000 years in the South China Sea: Core MD972151. *TAO*, **10**(1):239~254

- 85 Jennerjahn T C, Liebezeit G, Kempe S *et al.* Particle flux in the northern South China Sea. In: Jin X *et al.* eds. *Marine Geology and Geophysics of the South China Sea*. Beijing: China Ocean Press, 1992. 228~235
- 86 陈文斌, 徐鲁强, Jennerjahn T C. 南海北部颗粒能量的研究. 见: 郑连福, 陈文斌. 南海海洋沉积作用过程与地球化学研究. 北京: 海洋出版社, 1993. 191~201
- 87 Wiesner M G, Zheng L, Wong H K *et al.* Fluxes of particulate matter in South China Sea. In: Ittekkot V *et al.* eds. *Particle Flux in the Ocean*. New York: John Wiley & Sons Ltd, 1996. 293~312
- 88 陈建芳, 郑连福, Wiesner W 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. 科学通报, 1998, 43(6): 639~942
- 89 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. 沉积学报, 1998, 16(3): 14~19
- 90 黄 维, 汪品先. 末次冰期以来南海深水区的沉积速率. 中国科学(D辑), 1998, 20(1): 13~17
- 91 Sun X, Li X, Beug H-J, Pollen distribution in hemipelagic surface sediments of the South China Sea and its relation to modern vegetation distribution. *Marine Geology*, 1999, 156(1~4): 197~226
- 92 吴 莹, 张 经, 唐运千. 南海表层沉积物中有机物分布研究. 热带海洋, 1998, 17(3): 43~51
- 93 卞云华, 汪品先, 郑连福. 南海北部晚第四纪浮游有孔虫的溶解作用旋回. 见: 业治铮, 汪品先. 南海晚第四纪古海洋学研究. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1992. 261~273
- 94 汪品先, 卞云华, 葛知焜. 南沙海区晚第四纪的碳/氧盐旋回. 第四纪研究, 1997, (4): 293~300
- 95 Chen M T, Huang C Y, Wei K Y. 25 000-year late Quaternary records of carbonate preservation in the South China Sea. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1997, 129: 155~169
- 96 欧阳自远等. 小天体撞击与古环境灾变—新生代六次撞击事件的研究. 武汉: 湖北科学技术出版社, 1997. 170
- 97 Chen W, Zhou F. A study of volcanic glass in northern South China Sea during the last 100ka. In: Jin X *et al.* eds. *Marine Geology and Geophysics of the South China Sea*. Beijing: China Ocean Press, 1992. 174~178
- 98 杨育标, 范时清. 南海深海晚第四纪火山沉积物及其起源探讨. 热带海洋, 1990, 9(1): 53~60
- 99 Wiesner M G, Wang Y, Zheng L. Fallout of volcanic ash to the deep South China Sea induced by the 1991 eruption of Mount Pinatubo (Philippines). *Geology*, 1995, 23(10): 881~888
- 100 Hess S, Kuhnt W. Deep sea benthic foraminiferal recolonization of the 1991 Mt. Pinatubo ash layer in the South China Sea. *Maine Micropaleontology*, 1997, 28: 171~197

PROGRESS IN QUATERNARY PALEOCEANOGRAPHY OF THE SOUTH CHINA SEA: A REVIEW

Zhao Quanhong Wang Pinxian

(Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract

The last five years have witnessed a rapid progress in Quaternary paleoceanographic studies in the South China Sea (SCS). From Sonne 95 Cruise in 1994 to ODP Leg 184 in 1999, a series of international expeditions have been devoted to paleoclimatic records in the SCS, with emphasis laid on evolution and variations of the East Asian monsoon system. Up to now, at least 150 deep-water sediment cores

have been analyzed from the SCS (Fig. 1), with a progressive increase in core numbers and analysis items (Table 1).

Based on an integrated approach with biostratigraphic, magnetostratigraphic, isotope and carbonate stratigraphic methods applied, the Pleistocene stratigraphic sequence is for the first time established in the Nansha area of the southern SCS (Core 17957). Bio-events of four microfossil groups were used for its stratigraphy: planktonic foraminifers, radiolarians, nannofossils, and benthic foraminifers (Fig. 2, Table 2). A site with extremely high sedimentation rates from the northern slope (Core 17940) has provided high-resolution records of the last 40 000a, with sampling interval equal to less than 20 years (Fig. 3).

Various methods of paleo-SST estimations have shown a much more significant glacial / interglacial contrast in the SCS than in the open ocean, proving the "amplifying effect" of the marginal sea. Recent studies on the fluctuations of thermocline and the changes of deep-water masses have greatly improved our understanding of the history of upper ocean structure and deep-water paleoceanography of the SCS (Fig. 4).

The fine-grain size analysis of terrigenous material and the pollen analysis have revealed a correlation between the monsoon and glacial cycles. In general, the summer monsoon intensifies during interglacial, while winter monsoon strengthens in glacial stages. The SCS cores have recorded also the monsoon fluctuations on millennial time scale, as shown by both pollen and isotope analyses. Due to the intensification of winter monsoon, the climate contrast between the northern and southern parts of the SCS is remarkably enhanced during the glacial.

Recent progress in deep-sea sedimentological studies, such as sediment flux, volcanic ash and microtektite, is also reviewed. The paper concludes with some suggestions for the further paleoceanographic studies in the SCS.

Key words paleoceanography, Quaternary, South China Sea

同济大学教授、日本北海道大学教师、《第四纪研究》的热情撰稿人和支持者王律江博士,于1999年10月29日在南海与日本同行在潜海研究珊瑚礁时不幸牺牲。他短短36年的生命在正要迸出火花时不幸淹没于大海之中,令人不胜惋惜。