

# 南海北部 191 柱状沉积物主元素特征及其古环境意义

赵宏樵<sup>1</sup>, 韩喜彬<sup>1</sup>, 陈荣华<sup>1</sup>, 初凤友<sup>1</sup>, 高水土<sup>1</sup>

(1. 国家海洋局 第二海洋研究所 国家海洋局海底科学重点实验室, 浙江 杭州 310012)

**摘要:** 应用 XRF 法对南海北部陆坡 191 柱状沉积物中主元素进行分析, 结果显示, 全柱沉积物中 SiO<sub>2</sub> 含量最高, 其次是 CaCO<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 CaO。在垂向分布上 CaCO<sub>3</sub> 和 CaO 含量分布基本一致, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O, MgO 含量变化相似。结合 AMS 碳-14 测年, 可将 191 柱状样划分为 5 个地球化学层, 主元素和 MgO 与 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量比值在垂向上的旋回变化反映了南海北部氧同位素 3 期以来末次冰盛期、冰后期、晚冰期的气候变化、海平面波动及陆源物质供应的变化, 并对 Heinrich 事件、格陵兰高频气候振荡(D/O) 旋回、新仙女木事件以及普林斜氏虫低值事件等全球性短周期气候事件有很好的对应关系, 但受区域影响, 在时间上有所滞后。氧同位素 3 期以来的沉积速率并未显示出南海普遍存在的间冰期比冰期、暖期比冷期的沉积速率低的规律, 而是逐渐减小的, 这可能是氧同位素 3 期频繁的冷热干湿气候振荡导致岩石易于风化破碎受侵蚀后被洪水搬运的缘故。

**关键词:** 南海; 主元素; 古环境; 短周期气候变化; 沉积速率

中图分类号: P736.4

文献标识码: A

文章编号: 0253-4193(2008)06-0085-09

## 1 引言

南海位于东亚大陆和印度尼西亚—菲律宾岛弧链之间, 与西太平洋和东印度洋相通, 是西太平洋最大、发育最完善、最复杂的边缘海。南海地处东亚季风带, 是亚洲夏季风最早的暴发带<sup>[1]</sup>。其特殊的地理位置和地形条件使其对环境变迁, 尤其是对第四纪以来全球气候的频繁波动作出了非常灵敏的响应<sup>[2]</sup>, 冰期与间冰期、冷期与暖期的频繁交替、古海流以及东亚古季风气候的发育对南海海平面的波动、沉积物的供应、沉积相以及沉积体系的形成和改造起着重要作用<sup>[3]</sup>。因此, 这些对全球变化的区域响应也是南海本身发育演化的结果。目前南海已成为国际古海洋环境和古气候研究的热点区域之一<sup>[4-10]</sup>。

气候和环境的变迁影响着地球化学元素的富集、迁移和沉积状态, 不同的元素及其组合(比值)特征反映不同的环境条件和变迁, 是气候地质事件内

在成因和环境信息的综合体现和良好标志<sup>[11]</sup>。本文对南海北部陆坡 191 柱状沉积物的地球化学主元素进行了测试分析, 建立了该柱状沉积物的主元素地层序列, 并探讨了该海区晚第四纪以来古环境、古气候以及陆源输入物的变化。

## 2 材料和方法

2005 年“南海北部神狐海域天然气水合物调查”航次在南海北部取得了多个沉积物岩心, 其中 191 柱状样长 720 cm, 位于南海北部陆坡珠江口盆地外缘东沙群岛南 200 km 处的坡脚处(取样位置为 19° 02′ 95.0″ N, 116° 13′ 21.6″ E, 水深为 2 510 m)(见图 1), 由国家海洋局第二海洋研究所委托国土资源部广州第二海洋地质调查局用 SM-2 重力活塞取样器采集。整个柱状样基本上未受扰动, 沉积物岩性均匀, 主要为含钙质微体化石的黏土质粉砂, 其中 0~19 cm 为浅黄色有孔虫

收稿日期: 2007-03-12; 修订日期: 2008-09-22。

基金项目: 国家重点基础研究发展规划资助项目(G20000467)。

作者简介: 赵宏樵(1956—), 男, 浙江省富阳市人, 高级工程师, 从事海洋化学和地球化学研究。E-mail: hongqiaozhao@yahoo.com.cn

软泥, 在 9, 14 cm 处有黑色微层理, 10 cm 处有生物洞穴; 19~ 720 cm 为灰色有孔虫软泥, 从上到下颜色变化不大, 但有孔虫含量逐渐增加; 在 48, 62, 76, 97, 148, 170, 219, 255, 268, 273, 311 cm 等多处有生物洞穴; 在 129 cm 处有一粉砂夹层, 厚度仅有 0.2 cm 左右; 在 145, 164 cm 处约有 1 cm 厚的浊流层, 颜色为褐灰色。

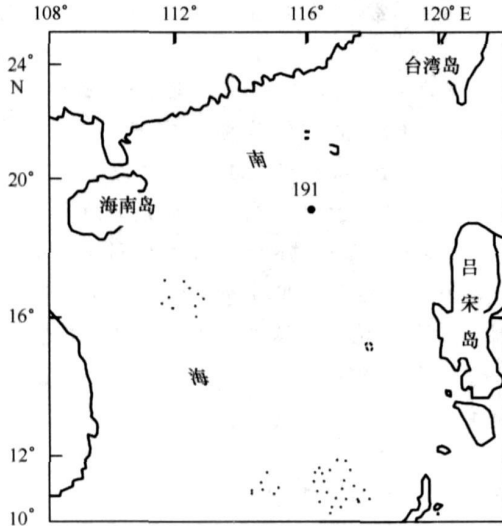


图 1 南海北部陆坡 191 柱状样位置图

按 10 cm 间距对 191 柱状样 89 个样品进行地球化学分析。样品经 -60 °C 冷冻干燥和玛瑙球磨机研磨后过 200 目筛供分析用。样品分析采用飞利浦 Venus200 和 Axios-Advanced X 荧光光谱仪、铬靶 X-射线管, 铍窗厚度为 300 μm, LiF200 晶体。测量条件为: P10 气体流量为 1.0 L/h, 冷却水流量为 1.0 L/min, 仪器内部温度为 37 °C, 介质的真空度小于 100 Pa, 工作电压为 50 kV, 工作电流为 4 mA, 粉末压片测定, 水系沉积物和海洋沉积物 (GBW07315, GBW07316) 标准物质做内控样进行校正, 同时用该物质进行校正。方法的精度: 主元素相对标准偏差 (RSD) 不大于 5%, 微量元素相对标准偏差不大于 10%。碳酸盐分析是采用元素分析仪法。对从 191 柱状沉积物中挑选的浮游有孔虫作 AMS 碳-14 测年, 由同济大学海洋地质国家重点实验室完成, 然后使用美国西雅图华盛顿大学第四纪同位素实验室 Minze Stuvier 编写的 CALIB 5.1 Beta 进行日历年转换, 其中海洋贮存库采用菲律宾 404 和南海西沙 406 柱样贮存库校正加权平均值 ( $\Delta R$ ) 的平均值<sup>[12]</sup>, 使用海洋放射性碳校正曲线 (Marine04)<sup>[13-14]</sup> 进行日历年校正, 年代控制点之间和控制点之外分别采用线性内插和线性外推方法建立年代框架 (表 1)。

表 1 南海北部陆坡 191 柱状沉积物 AMS 碳-14 测年年代及其对应的日历年

层位/cm	AMS 碳-14 测年距今时间/a	日历年距今时间/a
110	11 153 ± 45	12 980
383	23 262 ± 93	27 200
655	36 791 ± 229	39 600

## 3 结果

### 3.1 沉积地层时代划分

AMS 测年结合氧同位素地层是当今国际上分析海底柱状沉积物地层年代的有效方法和重要依据。191 柱状沉积物中主元素含量变化曲线完整、特征明显、峰谷形态清晰、变化幅度较大。通过与标准氧同位素含量变化曲线<sup>[15]</sup>对比, 并与 CaCO<sub>3</sub> 等常量元素含量变化曲线和 AMS 碳-14 测年校正后的日历年结合, 将 191 柱状沉积物进行地层划分 (见图 2), 柱状沉积物上部 150 cm 和中部 410 cm 处分别为氧同位素 MIS 1 期和 MIS 2 期的底界, 年代日历年分别为距今 15 000 和 28 43 ka, 这是氧同位素标准曲线 MIS 1 期、

MIS 2 期的底界。14 10 ka 碳-14 测年距今 12 050 和 28 10 ka (碳-14 测年距今 24 11 ka) 和南沙海区氧同位素 MIS 1 期的底界: 14 50 ka (碳-14 测年距今 12 35 ka)<sup>[16]</sup> 一致。191 柱状沉积物底部测年为距今 42 34 ka, 并没有见到 MIS 3 期的底界 (碳-14 测年距今 58 96 ka), 为末次冰期亚间冰期。在 MIS 2 期 320~ 200 cm, 测年距今在 23 68~ 17 80 ka, 与末次冰盛期 (last glacial maximum, 简称 LGM)<sup>[17]</sup> 基本一致。MIS 1 期对应于末次冰消期到全新世, 96~ 80 cm (测年日历年为距今 12 20~ 11 10 ka), 与 YD (新仙女木) 事件吻合<sup>[18]</sup>。YD 事件的结束标志着全新世的开始<sup>[19-21]</sup>。在 170~ 80 cm, 测年日历年为距今 16 00~ 7 00 ka, 这时刚脱离冰盛期, 气候仍然寒

冷, 为晚冰期, 又称为末次冰消期<sup>[22]</sup>, 末次冰消期以后就是冰后期的高海面阶段<sup>[23]</sup>。

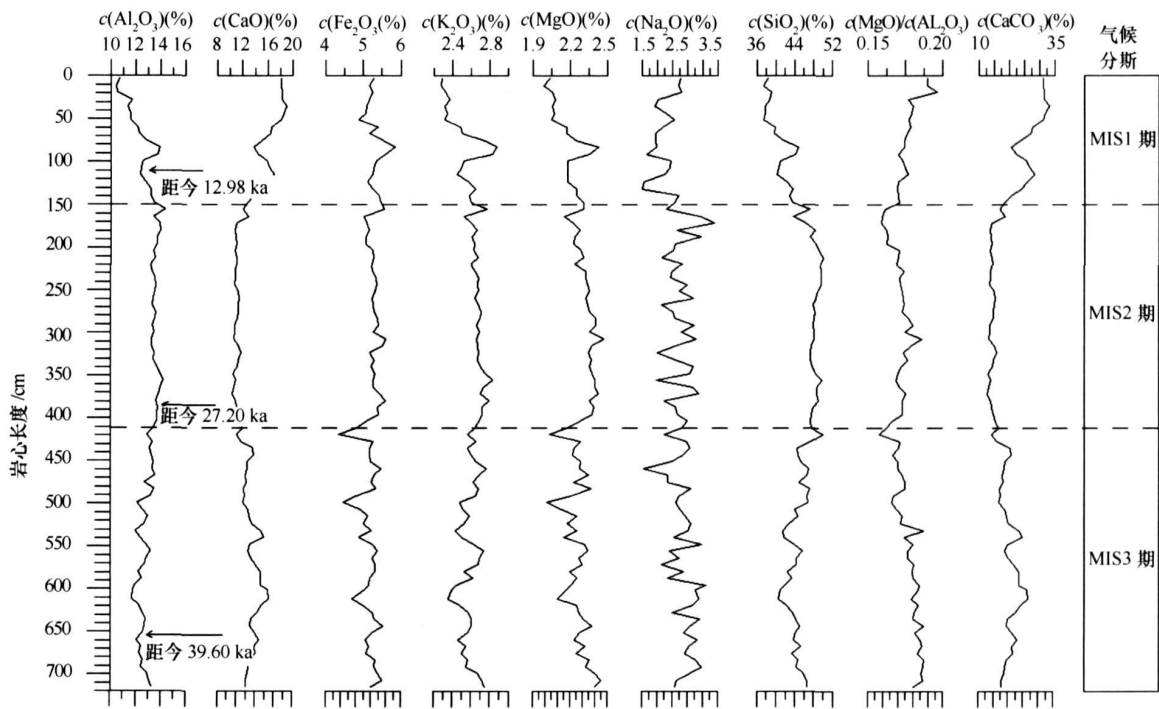


图2 南海北部陆坡 191 柱状沉积物测年日历年及主元素地层划分(MIS 为氧同位素期)

### 3.2 沉积速率

沉积速率主要受陆源碎屑物的输入、生源  $\text{CaCO}_3$  的供应和深海  $\text{CaCO}_3$  的溶解等因素的影响<sup>[24]</sup>。191 柱状沉积物在 MIS 1 期的沉积速率为  $0.01034 \text{ cm/a}$ ; 在 MIS 2 期的沉积速率为  $0.01852 \text{ cm/a}$ ; 在 MIS 3 期的厚度为 320 cm, 沉积速率为  $0.02232 \text{ cm/a}$ 。191 柱状沉积物在末次盛冰期的沉积速率为  $0.01923 \text{ cm/a}$ , 在全新世的沉积速率为  $0.0072 \text{ cm/a}$ , 在末次冰消期的沉积速率为  $0.01125 \text{ cm/a}$ , 高海面时的沉积速率为  $0.0857 \text{ cm/a}$ 。191 柱状沉积物的沉积速率显示该海区为一个高速率的沉积区, 比南海南部和西太平洋的都高, 比东沙群岛东南的 17940 站位的低<sup>[5]</sup>。191 柱状沉积物在 MIS 2 期的沉积速率比 MIS 3 期的沉积速率低, 并未表现出如南海其他海区表现的沉积速率高而在末次间冰期沉积速率低的特征<sup>[24]</sup>, 这很有可能是 MIS 3 期间全球气候处于弱暖期, 很不稳定, 变化频繁, 冷暖干湿交替频率高<sup>[25-27]</sup>, 在振荡气候的干冷状态下化学风化、冰缘碎裂和其他剥蚀作用造成岩石破碎, 而在温湿的另外一种状态下泛滥性流水很容易将已风化的陆源输入物搬运到低洼地带沉积<sup>[28]</sup>, 这也是与 191

柱状沉积物中主元素的变化是一致的。191 柱状沉积物在 MIS 2 期时的沉积速率比冰后期的高, 在末次冰盛期的沉积速率比在末次冰消期的沉积速率高, 在末次冰消期的沉积速率比在高海面时期的高, 这与南海东北部的 RC26—16 孔的沉积速率一致<sup>[29]</sup>, 也与以往得到的南海在末次冰期的沉积速率普遍大于冰后期的结论基本<sup>[24]</sup>一致, 说明随着末次冰期的结束, 全球开始变暖和海平面开始上升, 但在末次冰消期气候是振荡上升的, 海平面也是振荡变化的, 海水不断冲刷海岸线, 河流带来较多的沉积物, 随后随着海平面的稳步上升, 陆源输入物逐渐减少, 在本海区的生产力也逐渐降低。

### 3.3 元素含量

191 柱状沉积物中主元素含量如表 2 所示, 最多的是  $\text{SiO}_2$  ( $37.32\% \sim 50.06\%$ , 平均值为  $45.04\%$ ), 其次是  $\text{CaCO}_3$  ( $13.05\% \sim 33.68\%$ , 平均值为  $19.88\%$ ), 再次是  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $10.50\% \sim 14.34\%$ , 平均值为  $12.97\%$ ) 和  $\text{CaO}$  ( $7.31\% \sim 18.87\%$ , 平均值为  $11.14\%$ ), 排在其后的是  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (全铁) ( $4.34\% \sim 5.84\%$ , 平均值为  $5.22\%$ )、 $\text{Na}_2\text{O}$  ( $1.50\% \sim 3.88\%$ ,

平均值为 2.70%)、K<sub>2</sub>O (2.28% ~ 2.87%, 平均值为 2.60%) 和 MgO (1.99% ~ 2.47%, 平均值为

2.27%), 如图 2, 3 所示, 191 柱状沉积物中各主元素含量随深度的变化表现出一定的分层性。

表 2 南海 191 柱状沉积物不同深度主元素含量(%)及平均值

深度/cm	统计量	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	Na <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	CaCO <sub>3</sub>
0~150	平均值	12.22	15.62	5.27	2.49	2.16	2.20	40.36	27.88
	最大值	13.92	18.87	5.84	2.87	2.43	2.80	44.65	33.68
	最小值	10.50	11.79	4.87	2.28	1.99	1.50	37.32	21.04
150~410	平均值	13.65	8.29	5.29	2.68	2.34	2.78	48.21	14.80
	最大值	14.34	10.62	5.60	2.83	2.47	3.88	50.06	18.95
	最小值	13.25	7.31	5.01	2.52	2.15	1.97	43.56	13.05
410~720	平均值	12.75	11.42	5.14	2.59	2.26	2.86	44.65	20.39
	最大值	13.55	15.02	5.53	2.77	2.45	3.63	50.00	26.81
	最小值	11.72	8.18	4.34	2.36	2.02	1.55	40.58	14.60

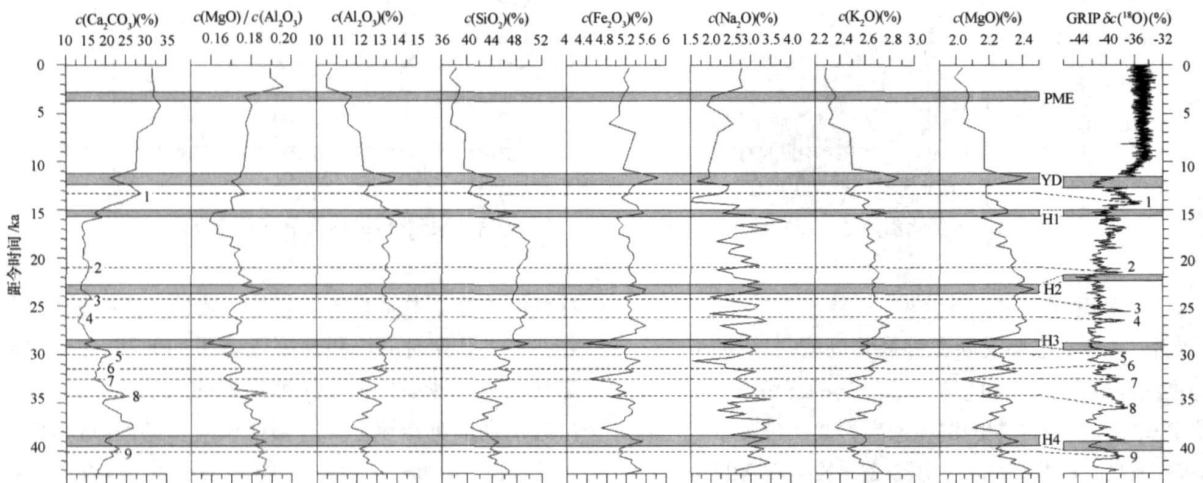


图 3 191 柱状沉积物主元素含量垂直变化与 GRIP  $\delta c(^{18}O)$  对比图

H1 为 Heinrich 事件, PME 为普林科氏虫低值事件, YD 表示新仙女木事件。数字 1, 2, ..., 9 代表 D/O 旋回事件

SiO<sub>2</sub>和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量变化一致,在岩心底部 720~410 cm 段含量较少,变化幅度较大,在 720~610 cm 段含量是振荡减少的,在 610~410 cm 段含量是振荡增加的,并在 617~598, 543~528 和 452~430 cm 段含量形成三个低谷。在 410~150 cm 段两者含量增加,变化比较平稳,在 400~340 和 252~170 cm 段含量较高,在 340~252 cm 段含量较少。在 150 cm 以上部位,它们的含量持续锐减,但在 97~78 和 32~23 cm 段含量的突然增加延缓了锐减的速度。

CaCO<sub>3</sub>与 CaO 的含量分布相同,在 720~

410 cm 段它们的含量较高,变化频率高,幅度较大,在 610 cm 以下它们的含量是曲折增大的,而在其上则是曲折减少的,在 617~598, 543~528 和 452~430 cm 段含量曲线形成隆起;在 648~631, 564~543 和 507~493 cm 段含量有 3 个低谷;在 410~150 cm 段它们的含量明显减少,且变化稳定;在 150 cm 以上部分,它们的含量逐渐增加,在 115 cm 处达到峰值,随后突然降低后再次逐渐增加,在 35 cm 处达到了最高值,并再一次突然减小,但幅度没有前者的大。

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O 和 MgO 含量变化基本相同,与

SiO<sub>2</sub>和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量变化类似,在720~410 cm段含量变化幅度较大,频度大;在410~150 cm段含量略有增加,变化平缓,从底部到上部逐渐减小,在319~300 cm段Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和MgO含量有1个峰值,与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和CaCO<sub>3</sub>含量的1个小低谷相对应;在150 cm以上含量变化较大,在底部含量跃升后快速减小,但在97~78 cm段却突然有峰值,在32~23 cm段K<sub>2</sub>O和MgO有1个小峰值,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>表现不明显,含量在51 cm后是逐渐增加的。

Na<sub>2</sub>O含量整体变化较大,振荡频率较高。在720~410 cm段Na<sub>2</sub>O含量为1.55%~3.63%,波动较大,频率较高,720~595 cm段是1个高值区;在410~150 cm段Na<sub>2</sub>O含量和变幅都比底部的略小,幅度比较均匀,频率也比较均匀;在150~0 cm段Na<sub>2</sub>O含量急剧减小,变化幅度较大,频率较小,在32 cm以上含量又增加。

MgO与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量比值为0.157~0.196,平均比值为0.175。在720~410 cm段其比值变化较大,数值趋于减小,但在527~539 cm段有一个峰值(最大值为0.188),在501~488和403~424 cm段有2个低谷;在410~150 cm段MgO与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量比值变幅较小,比值有所增大,到307 cm比值为0.186,形成1个峰值,而后逐渐减小,在170 cm达到最小的比值0.159;在150~0 cm段MgO与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量比值逐渐增加,到19 cm处比值为0.196,变幅较小,但在97~85和32~23 cm段有2个低谷。

## 4 讨论

元素在地层中的分布与气候变化有极大的关系,有着明确的古海洋学意义<sup>[31]</sup>。南海作为西太平洋最大的边缘海,陆源碎屑物质是海底沉积物的主要组成部分。从191柱状沉积物中主元素含量的垂直变化看,CaCO<sub>3</sub>,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,Na<sub>2</sub>O等主元素的分布大体可分为三类:CaCO<sub>3</sub>和CaO含量变化基本相同,钙为亲生物元素,来源于生物作用和生物化学作用,反映了该海区海平面和生物生产力的变化。海底沉积物中CaCO<sub>3</sub>含量的变化是一项对气候环境敏感的地球化学指标。在远离大陆的开阔海区,海底沉积物中CaCO<sub>3</sub>的主要来源是生物活动,尤其是带钙质外壳的生物,如有孔虫等<sup>[32-33]</sup>;在靠近大陆的边

缘海,碎屑CaCO<sub>3</sub>的输入,但一般来说除了河口三角洲地带,其质量与粗颗粒的生物成因CaCO<sub>3</sub>相比可以忽略不计。因此,边缘海沉积物中CaCO<sub>3</sub>的来源也主要是生物活动,即受表层海水生物生产力的影响。191柱状沉积物的CaCO<sub>3</sub>含量非常高,其变化范围为13.05%~33.68%,平均值为19.88%,说明本区沉积物的来源主要为生物成因,少量来自陆源物质输入。191柱状样水深为2510 m,恰好处于本区浮游有孔虫始溶带的下部或浮游有孔虫强溶带之上,在本柱状样的上部(0~120 cm),浮游有孔虫的优势种类主要为*Globorotalia menardii*,*Pulleniatina obliquiloculata*,*Neogloboquadrina dutertrier*,*Globigerinoides sacculifer*,*Globigerinoides ruber*<sup>[34]</sup>,表明该柱上部的沉积基本上与目前的海洋环境相同,并有明显的溶解作用。本柱状沉积物中CaCO<sub>3</sub>含量变化的基本趋势与汪品先等提出的“稀释作用”占主导地位的情形一致,总体上表现出CaCO<sub>3</sub>含量在冰期和冷期低、在间冰期和暖期高的“大西洋型”CaCO<sub>3</sub>旋回的特点<sup>[24,35]</sup>。SiO<sub>2</sub>,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,K<sub>2</sub>O,MgO含量变化相似,主要来自陆源的砂质碎屑和黏土矿物,其变化直接反映了陆源物输入/输出量的变化;元素钠、镁、钾等的化学活动性强,而且钠的化学活动性比钾、镁的强,化学活动性越强的元素在化学风化作用过程中很容易进入水中,并以离子形式迁移到海水中,从而导致该元素在陆源碎屑物质中出现亏损(海洋中沉积物对海水元素的吸附以及海洋生物地球化学作用等可使某些元素重新富集),在冰期或冷期地表温度较低,降雨量较少,不利于元素的化学风化和以溶解离子形式迁移,该期形成的沉积物大体保持着物源区母岩的元素地球化学特征。在间冰期或暖期地表温度较高,降雨量较大,有利于元素的化学风化并以离子形式迁移,因而该期形成的沉积物化学组分变异较大,所以Na<sub>2</sub>O的垂向分布变化频繁,幅度较大。海洋沉积物中MgO与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量比值大小主要反映陆源物质的输入量大小,比值越小,陆源物质输入越多,反之则越少<sup>[11]</sup>。MgO与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量比值变化可以较好地指示源区的气候环境因子变化的特征。

从上面的分析看,191柱状沉积物的主元素化学特征应该能够反映研究区地质历史时期沉积物的性质及物源区的风化特征。南海作为西太平洋最大的边缘海,由于受到晚新近纪全球性或区域性气候变化的影响,特别是冰期与间冰期、冷期与暖期的频

繁交替以及东亚古季风的发育,海平面波动和沉积环境的变化十分强烈。海陆交替、河流输入的变化以及海洋沉积动力学系统的变化等或多或少会在柱状沉积物中有所反映。根据沉积物中主元素含量变化,并参照浮游有孔虫<sup>[34]</sup>和与格陵兰冰心 GRIP ( $\delta^{18}\text{O}$ )<sup>[36]</sup>对比,大体将 191 柱状沉积物划分为如下几个地球化学单元(见图 3)。

(1) 末次冰期亚间冰期沉积(720~410 cm)对应于氧同位素 3 期,也被称为玉木亚间冰期或末次间冰阶沉积,元素含量变化大,反映出沉积环境的变化较为频繁而剧烈,在较为开放富氧化的环境中变动。海水发生入侵,当时南海的古岸线大约在现代水深 20 m 处<sup>[37-38]</sup>,海平面波动也较大。沉积速率在该时期很大,陆源输入物逐渐增加。从整体上看气候比较温暖,波动较大,并在振荡中逐渐变冷。快速的短周期气候变化与格陵兰岛 GRIP 岩心有很好的对应关系,如 Heinrich 事件<sup>[30,39]</sup>的 H4 距今日历年为(39.42~38.36 ka)、H3 的距今日历年为(29.20~28.45 ka)及格陵兰高频气候振荡旋回(Dansgaard/Oeschger 旋回,简称 D/O 旋回)事件<sup>[25]</sup>的 9, 8, 7, 6, 5 期等,具有全球性,但时间上响应略有延迟,可能是由于南海区域响应及西太平洋暖池的影响。H3 事件与 H4 事件有所不同,虽然海平面有所下降,但陆源输入物增加,仍处在较强的氧化环境中, H3 事件的结束标志着较为温暖的气候时期的结束和寒冷气候时期的到来。

(2) 末次冰期极盛期沉积(410~150 cm)海平面下降,对应于氧同位素 2 期,也称为晚玉木冰期沉积。在该段  $\text{CaCO}_3$  和  $\text{CaO}$  含量最低,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{MgO}$  含量最高,  $\text{MgO}$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量比值减小。当时气温和海平面急剧下降,海平面下降到 120~150 m, 古岸线向外推移约 100~220 km, 河流切割作用明显<sup>[40]</sup>, 与太平洋的水体交流不畅,因为南海是一个半封闭的边缘海。此时沉积速率降低,陆源输入物减少,到 H2 时期(距今日历年为 23.68~22.76 ka)减到最小,海平面下降到最低,沉积物处于较强的还原环境中,这段时间前后也被称为末次冰盛期<sup>[17]</sup>。这里的 H2 事件要比格陵兰岛发生的要早些,可能是受东亚东北季风影响的缘故。之后虽然海平面升高幅度不大,但陆源输入物逐渐增加,直到 H1 事件(距今日历年为 15.59~14.95 ka)早期达到最大值,说明入海河流携带泥沙增加,可能是末次盛冰期后期冰雪融化和

降水量有所增加。H1 也是一次变冷事件,又称为老仙女木事件,它标志着氧同位素 2 期的结束。在末次盛冰期也有短暂的气候回暖事件<sup>[31]</sup>, D/O 旋回的 4, 3 和 2 期与格陵兰岛有较好的对应关系。

(3) 晚冰期沉积(150~96 cm)对应于氧同位素 1 期的早期,也被称为末次冰消期沉积。在此阶段  $\text{CaCO}_3$  和  $\text{CaO}$  含量急剧增大,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{MgO}$  含量急剧减小,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量有所减小,  $\text{MgO}$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量比值增大,气温开始回暖,冰雪开始消融,所以也被称为 Bolling-Allerod 暖期<sup>[41]</sup>, 但气候仍然比较寒冷,海平面上升,在 110.5 cm 处达到最高,这与格陵兰岛冰心中的温暖事件 D/O 旋回中的 1 事件有很好的对应关系,是一次全球融冰事件<sup>[42]</sup>。在此段沉积速率下降,陆源输入物减少,南海与西太平洋暖水交换略有增加<sup>[18]</sup>,沉积物处于较为开放的富氧化的环境中,来自海洋的沉积物增加。

(4) 新仙女木事件(Younger Dryas event, 简称 YD 事件)(96~80 cm)是末次冰消期升温过程中发生的一次突然快速变冷事件,是迄今对冰心、陆地和海洋沉积物的古气候记录研究最为详细的、离现今最近的、最强烈的一次变冷事件,气温的最大降幅在挪威可在 8~10 °C<sup>[43]</sup>。较为公认的 YD 事件的年代界于距今 11~10 ka<sup>[44]</sup>, Bond et al.<sup>[45]</sup>最近标定的日历年界限是距今 12.9~11.5 ka, 峰值在距今 12.2 ka。在本海区有所延迟,在距今 12.20~11.10 ka,  $\text{CaCO}_3$  和  $\text{CaO}$  含量突然减少,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{MgO}$  含量突然增加,  $\text{MgO}$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量比值突然减小,与在冲绳海槽的 180, KL22, DGKS9603 和 OR281-12P 等站位发现的 YD 记录<sup>[46]</sup>有很好的对应,这可能都是受西太平洋暖池的影响而滞后。在此段时间海平面明显下降,沉积速率增加,陆源输入物增加,气温明显下降,但还没有达到末次冰盛期的幅度,沉积物化学活动性减弱。YD 事件的结束标志着冰后期的开始。

(5) 冰后期沉积(80~0 cm)又称全新世沉积。在此期间  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaO}$  含量和  $\text{MgO}$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量比值迅速增加,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{MgO}$  含量迅速减少,直到 32 cm 处,这段时间的气温升高,全球进入一个大暖期(megathermal)或温度最适宜时期,我国西部平均气温比现今高约 5 °C<sup>[47]</sup>,海平面升高,在距今日历年 6~4 ka 达到最高,为大暖期之鼎盛时期(megathermal maxium),为全新世高海面时

期<sup>[48]</sup>, 钱建兴<sup>[49]</sup>曾估算南海北部此时的海平面较现代海平面高 6 m 以上, 珠江三角洲和韩江三角洲钻孔揭示的潮州组海侵层也对应了此时的高海面时期<sup>[3]</sup>, 降水量多, 沉积速率降低, 陆源物质减少, 沉积物处于富氧化的化学风化作用强烈的环境中。

在 32~ 23 cm 处  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  含量及  $\text{MgO}$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量比值突然减小,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  和  $\text{MgO}$  含量突然增大,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  含量也有所增加, 测年为距今 3.68~ 2.78 ka, 这为 1 个小的气候波动, 气温和海平面下降, 陆源物质增加, 这与在全球发现的全新世晚期距今 4~ 2 ka 的变冷事件“普林斜氏虫(*Pulleniatina obliquiloculata*) 低值事件”一致<sup>[50]</sup>, 为全球性事件。

此后进入到现代海平面时期, 气候温凉, 陆源输入物质减少。

## 5 结论

根据上述对南海东北部 191 柱状沉积物中主元素富集变化特征的分析, 初步获得以下结论:

(1) 191 柱状沉积物中  $\text{CaCO}_3$  和  $\text{CaO}$  含量分布

基本一致,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$  含量变化相似, 它们分别反映了南海北部陆源环境和海洋环境的变化;

(2) 根据主元素含量变化及年龄的确定, 可将 191 柱状样划分为 5 个地球化学层, 主元素和  $\text{MgO}$  与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量比值在垂向上的旋回变化反映了南海北部氧同位素 3 期(末次冰期亚间冰期)以来的气候变化、海平面波动及陆源物质供应的变化; 在 Heinrich 事件、D/O 旋回、YD 事件以及普林斜氏虫低值事件等短周期气候的全球性事件上都有很好的对应关系, 在时间上略有滞后, 可能是区域响应的缘故;

(3) 在该海区末次冰期亚间冰期以来沉积速率逐渐减小, 氧同位素 3 期的高沉积速率与其期间频繁的气候振荡和海平面波动有关, 这与前人对南海间冰期比冰期、暖期比冷期的沉积速率低的结论略有不同。

国家海洋局第二海洋研究所张富元研究员、时连强博士和雷吉江硕士针对文章提出了很多中肯的意见和建议, 在此表示衷心感谢。

## 参考文献:

- [1] 丁一汇, 李崇银. 南海夏季风爆发和演变及其与海洋的相互作用[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 112—116
- [2] 赵泉鸿, 汪品先. 南海第四纪古海洋学研究进展[J]. 第四纪研究, 1999(6): 481—501.
- [3] 刘昭蜀, 赵焕庭, 范时清, 等. 南海地质[M]. 北京: 科学出版社, 2002
- [4] 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意义[J]. 地质学报, 1986, 60(3): 215—225.
- [5] 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[J]. 第四纪研究, 1999(1): 27—31.
- [6] 赵泉鸿, 翦知湓, 王吉良, 等. 南海北部晚新生代氧同位素地层学[J]. 中国科学(D辑), 2001, 31(10): 800—807.
- [7] 汪品先, 翦知湓, 赵泉鸿, 等. 南海演变与季风历史的深海证据[J]. 科学通报, 2003, 48(21): 2228—2239.
- [8] WANG Gui-hua, CHEN Da-ke, SU Ji-lan. Generation and life cycle of the dipole in the South China Sea summer circulation [J]. Journal of Geophysical Research—Oceans, 111(C6): C06002
- [9] ZHANG Yi-ge, JI Jun-feng, BALSAM William L, et al. High resolution hematite and goethite records from ODP 1143, South China Sea: Co-evolution of monsoonal precipitation and El Nino over the past 600 000 years[J]. Earth and Planetary Science Letters 2007, 264(1—2): 136—150
- [10] BOULAY S, COLIN C, TRENTESAUX A, et al Mineralogy and sedimentology of Pleistocene sediment in the South China Sea (ODP Site 1144)[G] // PRELL W L, WANG P, BLUM P, et al Proceedings of the Ocean Drilling Program(Scientific Results)2003, 184: 1—21 [EB/OL]. (2006-07-14) [2007-02-07] Http://www.odp.tam.u.edu/publications/184\_SR.
- [11] 颜文, 古森昌, 陈列忠, 等. 南海 97-37 柱样的主元素特征及其潜在的古环境指示作用[J]. 热带海洋学报, 2002, 21(2): 75—83
- [12] SOUTHON J, KASHGARIAN M, FONTUGNE M, et al Marine reservoir corrections for the Indian Ocean and Southeast Asia [J]. Radiocarbon, 2002, 44: 167—180
- [13] STUIVER M, REIMER P J Extended  $^{14}\text{C}$  data base and revised CALIB 3.0  $^{14}\text{C}$  age calibration program [J]. Radiocarbon, 1993, 35: 215—230
- [14] STUIVER M, REIMER P J, REIMER R W. CALIB 5.0 [EB/OL]. (2006-07-22) [2007-02-10]. http://calib.qub.ac.uk
- [15] MARTINSON D G, PISIAS N G, HAYS J D, et al Age dating and orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0—300 000-year chronostratigraphy [J]. Quaternary Research, 1987, 27: 1—29
- [16] 陈木宏, 蔡慧海, 涂霞, 等. 南沙群岛及临近海区晚第四纪的微体生物与环境[M]. 北京: 海洋出版社, 1996: 121—201.

- [17] MIX A C, BARD E, SCHNEIDER R. Environmental processes of the ice age: land, oceans, glaciers (EPILOG) [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2001, 20: 627—657.
- [18] 黄玥, 冉莉华, 蒋辉. 南海北部陆坡晚更新世末期硅藻及其古环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(4): 7—13
- [19] 温孝胜, 彭子成, 赵焕庭. 中国全新世气候演变研究的进展[J]. *地球科学进展*, 1999, 14(3): 292—298
- [20] 吴江滢, 汪永进, 孔兴功. 贵州白骨洞石笋记录的全新世季风气候演化与突变[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(5): 55—60
- [21] 杨子廉. *海洋地质学* [M]. 济南: 山东省教育出版社, 2004: 222—246
- [22] 庄振业. *第四纪环境演变* [M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1999: 30—52
- [23] LAM BECK K, CHAPPELL J. Sea level changes through the last glacial cycle [J]. *Science*, 2001, 292(5517): 679—686
- [24] 汪品先, 卞云华, 王律江. *深海碳酸盐[M] // 十五万年的南海*. 上海: 同济大学出版社, 1995: 33—39
- [25] DANSGAARD W, WHITE J W C, JOHNSEN S J. The abrupt termination of the Younger Dryas climate event [J]. *Nature*, 1989, 339: 532—534
- [26] ALLEY, R B, MAROTZKE J, NNRDHAUS W D, et al. Abrupt climate change [J]. *Science*, 2003, 299(5615): 2005—2010
- [27] 郑洪波, 杨文光, 贺娟, 等. 南海的氧同位素 3 期[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(1): 68—78
- [28] ZHANG P Z, MOLNAR P, DOWNS W. Increased sedimentation rates and grain sizes 2–4 Myr ago due to the influence of climate changes on erosion rates [J]. *Nature*, 2001, 410: 891—897.
- [29] 魏国彦, 李孟扬, 段威武, 等. 南海东北部末次冰期—全新世古海洋学[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(3): 19—25
- [30] BOND G C, BROECKER W S, JOHNSEN S, et al. Correlation between climate records from North-Atlantic sediments and Greenland ice [J]. *Nature*, 1993, 365: 143—147.
- [31] 苍树溪, 闫军. *西太平洋特定海域古海洋学* [M]. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1992
- [32] 钱建兴. *晚第四纪以来南海古海洋学研究* [M]. 北京: 科学出版社, 1999: 79—110
- [33] 郑连福, 陈文斌. *南海海洋沉积作用过程与地球化学研究* [M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 109—123
- [34] 范维佳, 陈荣华, 赵泉鸿, 等. 南海北部 191PC 柱样沉积物中浮游有孔虫特征及其古环境意义[J]. *微体古生物学报*, 2007, 24(3): 233—241.
- [35] WANG L, SARNTHEIN M, ERLKENUSER H, et al. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China Sea [J]. *Marine Geology*, 1999, 156: 245—284
- [36] DANSGAARD W, JOHNSON S J, CLAUSEN H B, et al. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record [J]. *Nature*, 1993, 364: 218—220
- [37] 徐明广, 马道修, 周青威, 等. 珠江三角洲地区第四纪海平面变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1986, 6(3): 93—102.
- [38] 蓝先洪. 珠江三角洲  $\Delta 22$  孔的沉积特征及地层划分[J]. 148—154
- [39] HEINRICH H. Origin and consequences of cyclic ice rafting in the northeast Atlantic Ocean during the past 130,000 years [J]. *Quaternary Research*, 1988, 29: 142—152
- [40] 鲍才旺. 珠江口陆架区埋藏古河道与古三角洲[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1995, 15(2): 25—34
- [41] HOLMOS A. *Principles of Geology* [M]. London: Thomas Nelson, 1965
- [42] FAIRBANKS R G. A 17,000-year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep ocean circulation [J]. *Nature*, 1989, 342: 637—647.
- [43] FANNING A F, WEAVER A J. Temporal-geographical meltwater influences on the North Atlantic conveyor: implications for the Younger Dryas [J]. *Paleoceanography*, 1997, 12(2): 307—320
- [44] BROEKGE WS, ANDRGE M, WOLFLI W, et al. The chronology of the last deglaciation: implication to the cause of the Younger Dryas event [J]. *Paleoceanography*, 1988, 3: 1—19.
- [45] BOND G, SHOWERS W, CHESEBY M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in north Atlantic Holocene and glacial climates [J]. *Science*, 1997, 278: 1257—1266
- [46] 余华, 李巍然, 刘振夏, 等. 冲绳海槽晚更新世以来高分辨率古海洋学研究进展[J]. *海洋科学*, 2005, 29(1): 54—58.
- [47] 吴中海, 赵希涛, 吴珍汉, 等. 西藏纳木错及邻区全新世气候与环境变化的地质记录[J]. *冰川冻土*, 2004, 26(3): 275—283
- [48] 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件[J]. *中国科学(B辑)*, 1992, 12: 70—78
- [49] 钱建兴. 氧同位素古海水温度计与古气候[J]. *海洋通报*, 1984, 3(5): 86—90
- [50] 翦知湓, 李保华, PFLAUMANN U, 等. 西太平洋晚全新世变暖事件[J]. *中国科学(D辑)*, 1996, 26(5): 461—466

## Characteristics of main elements and their palaeoenvironment significance of Core 191 in the northern South China Sea

ZHAO Hong-qiao<sup>1</sup>, HAN Xi-bin<sup>1</sup>, CHEN Rong-hua<sup>1</sup>, CHU Feng-you<sup>1</sup>, GAO Shui-tu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Laboratory of Submarine Geosciences of State Oceanic Administration, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

**Abstract:** The main elements of Core 191 are analyzed using the method of XRF in the northern South China Sea. The results show that the main element of the highest content is SiO<sub>2</sub>, the next is CaCO<sub>3</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and CaO. In the vertical distribution the content of CaCO<sub>3</sub> is coincident with that of CaO, and the content of SiO<sub>2</sub> is similar to that of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, K<sub>2</sub>O and MgO. Combined with the dating of AMS(carbon-14), five geochemistry layers are divided, this is indicated that the changing of main elements and the content ratio of MgO to Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> along the core have reflected the evolution of climate, sea level and terrigenous matter supply since oxygen isotope Stage 3 in the northern South China Sea. And the changing has good correspondence to short period global climate change such as Heinrich event, Dansgaard-Oeschger gyration, Younger Dryas event and *Pulleniatina obliquiloculata* event, just little late to Greenland Island ice core because of regional response. Since oxygen isotope Stage 3, the deposited rate in the study area has dropped, not as the common result that the deposited rate in interglacial stage or warm period is higher than that in glacial stage or cold period in other areas of the South China Sea. The reason is that rocks are easier to weathering and to eroding in the frequent climate oscillation of heat and cold or dryness and wetness in this stage.

**Key words:** South China Sea; main elements; palaeoenvironment; short period global climate change; deposited rate