

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020052501

南海北部陆坡 30 ka 以来的沉积环境演变

李平原^{1,2,3}, 路剑飞¹, 夏真¹, 甘华阳^{1,2}, 倪玉根^{1,3}, 王俊珠¹, 常晓红¹

1. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510760

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广州 511458

3. 中国地质调查局南海地质科学院, 三亚 572024

摘要:南海是西太地区最大的边缘海,汇集了周边陆地大量碎屑物质。这些陆源碎屑通过复杂的洋流系统经陆坡大量的输送到南海深海海盆中,使陆坡成为研究深海沉积物源汇体系不可缺少的重要环节。但陆坡区域水深变化大,洋流体系复杂,加之冰期间冰期海平面升降和季风的变化,使陆坡沉积环境一直成为研究的难点。为了研究陆坡沉积环境的演变过程,本文选用了南海北部陆坡中部和底部的两个重力柱开展元素地球化学方面的研究,探讨陆坡区域近三万年以来的沉积环境特征。研究发现海平面和季风是影响区域沉积环境的两个重要因素:(1)海平面变化是控制陆坡陆源物质/深海钙质碎屑变化的主要因素;(2)研究区域地层发育有“碳酸盐稀释事件”与东亚夏季风在全新世初期(11.5~8.5 kaBP)增强有关。

关键词:沉积环境;冰期-间冰期;海平面变化;碳酸盐稀释事件;南海北部陆坡

中图分类号:P736.21

文献标识码:A

Sedimentary environmental evolution for the past 30 ka of the northern continental slope of the South China Sea

LI Pingyuan^{1,2,3}, LU Jianfei¹, XIA Zhen¹, GAN Huayang^{1,2}, NI Yugen^{1,3}, WANG Junzhu¹, CHANG Xiaohong¹

1. Guangzhou Marine Geological Survey, Ministry of Natural Resources, P. R. China, Guangzhou 510760, China

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory, Guangzhou 511458, China

3. Academy of South China Sea Marine Geological Science, China Geological Survey, Sanya 572024, China

Abstract: The South China Sea is the largest marginal sea in the Western Pacific, which receives massive sediments from the surrounding landmasses. Terrestrial sediments are transported into the deep basin via a complex ocean current system, with the continental slope as a key component of the source-to-sink process. However, past changes in sedimentary environment of the continental slope remain rarely understood, because of the drastic variations in water depth and complicated current systems in addition to sea level changes induced by glacial-interglacial cycles and the changes in trade wind. In this research, two gravity cores collected from the northern South China Sea are used to study the sedimentary environmental evolution of the continental slope. One is located in the middle of the slope, and the other at the lower part of the slope. According to the results of element geochemistry, it is revealed that: 1) the sea level change is the key factor which controls the changes in the ratio of terrigenous to biogenic components of the sediments; 2) a carbonate dilution event is found related to the intensification of the East Asian Summer Monsoon during the early Holocene from 11.5 to 8.5 kaBP.

Key words: sedimentary environment; glacial- interglacial periods; sea level changes; carbonate-dilution event; the northern continental slope of the South China Sea

南海周边区域是现今全球表层陆地风化剥蚀作用最强、剥蚀速率最大的地区,区域内河流每年向南海供给7亿t沉积物,约占全球总量的3.7%,使南海成为世界上接受陆源物质最多的边缘海之一^[1-2]。南海同时受东亚季风和深层洋流形成多层次的洋

流系统的影响,水动力条件十分复杂,对沉积物的源汇搬运沉积过程具有非常巨大的影响^[2-3]。因此,南海具有开展海洋沉积学和古环境演变研究的优势。

南海北部陆坡是华南和台湾地区陆源物质输送到深海海盆的重要路径,同时也是这些区域陆源

资助项目:中国地质调查局“珠江口伶仃洋地区综合地质调查”项目(DD20190289);中国地质调查局海域天然气水合物资源勘查工程二级项目(DD20190218)

作者简介:李平原(1986—),男,博士研究生,工程师,主要从事海洋沉积学、海岸带沉积环境演变与第四纪环境研究, E-mail: lpy19862006@126.com

收稿日期:2020-05-25; 改回日期:2020-07-29. 文凤英编辑

碎屑堆积的重要场所。相比陆架和深海海盆, 陆坡沉积环境十分复杂, 沉积物来源多, 水动力因素繁杂^[4], 海平面、气候和洋流都对沉积环境影响深远, 尤以冰期间冰期海平面变化对其影响最为强烈^[5], 因此, 陆坡区域沉积环境恢复具有较高的难度。本文拟通过采自南海陆坡中部和底部的两个重力柱, 通过地球化学和粒度分析, 探讨三万年以来南海北部陆坡区沉积环境的演变特征。

1 区域背景

研究区域位于南海北部珠江口外海域, 水深为 200~3800 m, 等深线总体与海岸线平行, 呈 NE-SW 向延伸。研究区域按照地形^[6](图 1) 可以分为上陆坡、陆坡台地和下陆坡。上陆坡带(200~1400 m)

坡度 1°~2°, 宽度约为 60~80 km, 以较为平缓的坡角向深海延伸; 陆坡 1400~1600 m 处发育有陆坡台地, 台地面起伏不大, 不连续地分布在陆坡中部; 台阶面南缘至 3500 m 以深为下陆坡, 坡度 1°~3°, 坡度变陡, 受海底沟谷强烈切割; 陆坡底部经平行于陆坡的海底沟谷过渡到深海洋盆^[7-9](图 1)。研究区域环流系统十分复杂。按照水深, 研究区域水团从上至下分为 4 层: 表层至温跃面为季节性环流, 冬季(10 月至次年 3 月)为西南向顺时针环流, 夏季(4~9 月)为东北向逆时针环流; 温跃层之下至 500 m 深度为上层水团, 发源于西太平洋上层水, 沿着陆架和陆坡逆时针运动; 500~1500 m 为南海中层水团, 顺时针沿着陆坡进入西太平洋; 1500~3500 m 以深为南海深层水团, 发源于西太平洋深层水, 经巴士海峡呈逆时针进入南海, 沿着陆坡向西流动^[10-12]。

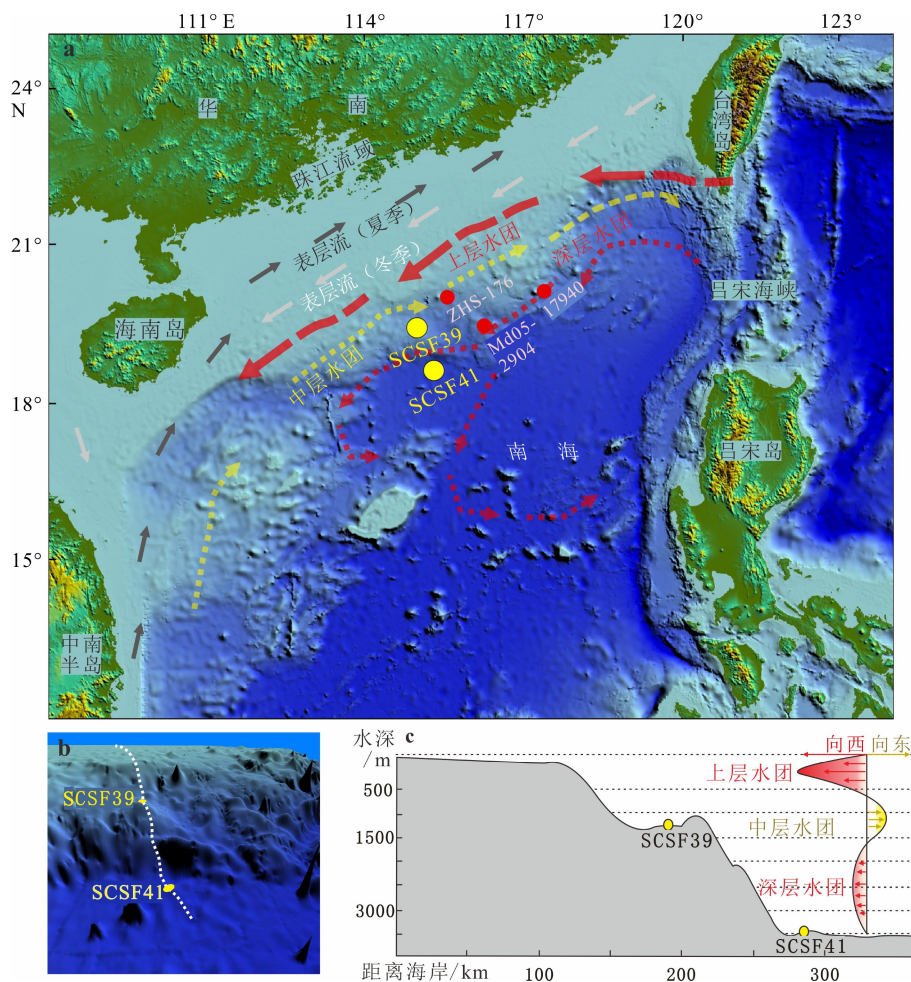


图 1 研究区域及周边地形图

a. 研究区域地形图, b. 研究站位的三维地形图示, c. 研究站位地形剖面。
图中地形数据根据参考文献 [6] 绘制, 洋流数据根据参考文献 [10-12] 绘制。

Fig.1 Topographic map of the studied area

a. Topographic map of the area; b. three dimensional map of the studied region; c. topographic profile of studied sites; topographic data is derived from Ref.[6], current distribution cited from ref.[10-12].

2 材料方法及年代框架

本文所用的材料是2015年中德联合调查航次使用的广州海洋地质调查局海洋4号地质调查船在南海北部陆坡获得的两个柱状样(表1), SCSF39采自南海陆坡水深1494 m处, 位于陆坡台地的凸起地形上, 岩芯长420 cm, 岩性为灰色泥质粉砂, 岩性均一, 没有明显的层理, 含有有孔虫壳体; SCSF41采自陆坡底部, 陆坡与海盆的转折处, 水深3717 m, 岩芯长460 cm, 岩性为棕灰色泥质粉砂沉积, 沉积均一, 含有有孔虫壳体。图1b和c所示两根重力柱均位于相对坡度较小、相对于周围略凸起的微地形之上, 使其免受浊流的影响。此外, 两个柱状样岩性均以较细的泥质粉砂为主, 颗粒均一, 不见浊流发育的层理, 对还原古沉积环境具有较好的优势。

本文对两个重力柱开展AMS¹⁴C测年、碳酸盐地层对比和有孔虫同位素定年, 建立35 kaBP以来年龄框架(图2和图3)。样品¹⁴C测年数据由Beta实验室测试完成, 主要采用有孔虫*Globigerinoides ruber*(*G. ruber*)壳体碳酸盐测年, 使用Calib 7.0.1软件对所获得的¹⁴C年龄进行日历年龄校正。对两根柱子以5 cm间隔取样, 经干燥、浸泡、冲洗、筛选出有孔虫*G. ruber*壳体, 后用Thermo MAT 253质谱仪进行氧碳同位素测定。

在SCSF39和SCSF41站位研究中, 发现其元素地球化学记录中存在较为清晰的“碳酸盐稀释事件”。Huang等^[13]发现11.0~8.5kaBP在南海北部东沙至西沙陆坡区域沉积物中碳酸盐含量减少的事件被称为“碳酸盐稀释事件”, 该事件研究十分成熟, 常作为标志事件用来校正地层的年龄框架。本文选取研究区附近的ZHS-176站位(水深1383 m)^[14]作为参考, 通过该站位CaCO₃与SCSF39和SCSF41两站位CaO含量为研究站位提供较为可靠的年龄控制点(图2)。

同时本文还采用前人^[15-16]的研究方法, 通过SCSF39和SCSF41站位的氧同位素对比附近的17940站位有孔虫氧同位素^[15, 17], 获得年龄控制点, 并与附近MD05-2904站位氧同位素^[18-19]进行比较来验证年

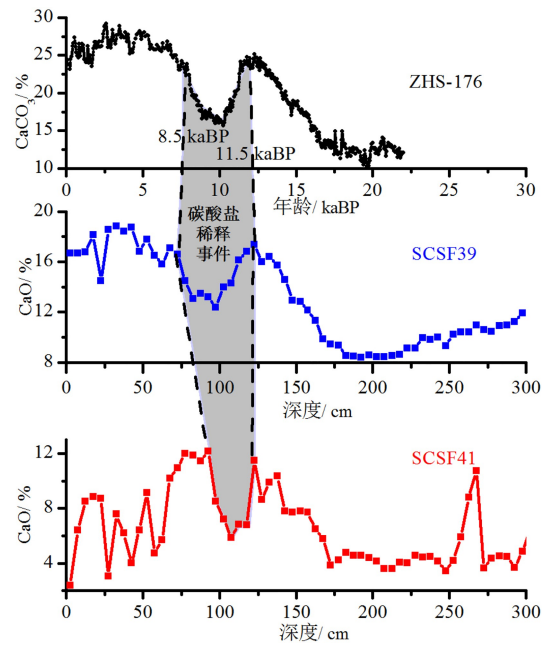


图2 SCSF39 站位和 SCSF41 站位与 ZHS-176 站位碳酸盐稀释事件对比分析
ZHS-176 数据来自参考文献 [14]。

Fig.2 Comparison of carbonate-dilution events from Core ZHS-176, Core SCSF 39, SCSF41 and Carbonate Core ZHS-176 derived from ref. [14].

龄框架的可靠性(图4)。通过上述方法结合获得两个站位的年龄控制点后, 通过线性内插分别计算出两个站位的年龄。

对 SCSF39 和 SCSF41 两个重力柱以 5 cm 间隔取样, 从上至下分别获得 94 个样品和 92 个样品, 用来进行地球化学元素测试和粒度测试。样品地球化学元素测试采用 XRF 压片法测试, 每个样品称取约 3 g, 40 °C 烘干 6 h, 120 °C 烘干 2 小时, 冷却至室温; 研磨后以硼酸为辅料在液压机上压成饼状, 放入 Axios XRF (SYC186) X 荧光光谱仪进行测试, 常量元素误差小于 0.1%。

样品粒度测试采用 Mastersizer3000 激光粒度仪测试, 取约 1 g 沉积物样品, 分别加入 5 mL 30% 的双氧水(H₂O₂)和 0.25 mol/L 的盐酸除去样品中的有机质和碳酸盐。用蒸馏水洗去样品中的盐酸至中性, 再将处理后的样品经超声波振荡分散, 使用激光粒度

表 1 SCSF39 站位和 SCSF41 站位基本信息

Table 1 Details of Core SCSF39 and SCSF 41

	位置		水深/m	获取岩芯长度/cm	岩芯年龄/kaBP	平均沉积速/(cm/ka)
	经度/E	纬度/N				
SCSF39	114.97°	19.41°	1494	420	36.1	11.6
SCSF41	115.29°	18.61°	3717	460	36.7	12.5

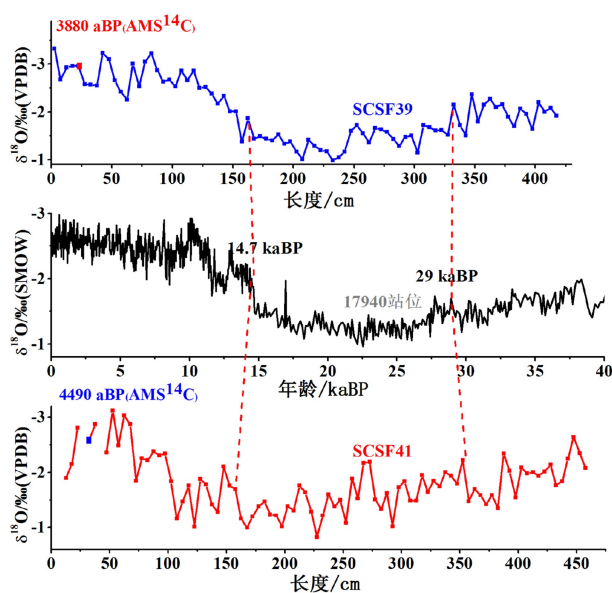


图 3 SCSF39 站位和 SCSF41 站位与 17940 站位氧同位素数据对比
17940 冰芯氧同位素数据来自参考文献 [15, 17]。

Fig.3 Comparison of foraminifer oxygen isotope in Core SCSF 39, SCSF41 and foraminifer oxygen isotope in 17940 oxygen isotope data of 17940 is derived from ref.[15] and ref.[17].

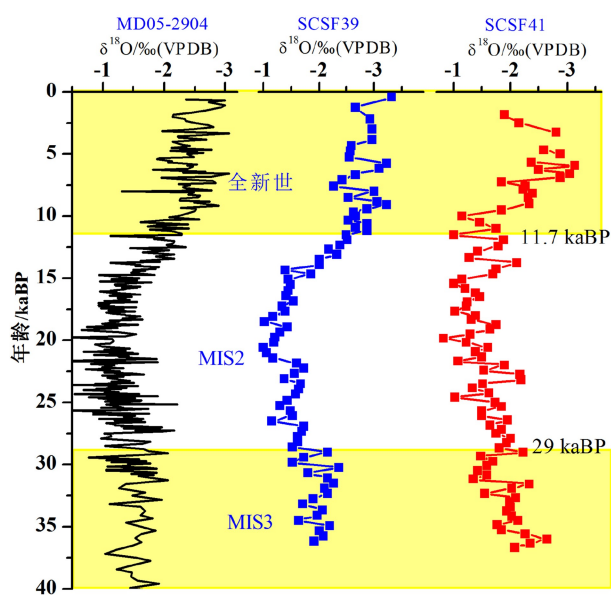


图 4 SCSF39 站位和 SCSF41 站位与 MD05-2904 站位有孔虫氧同位素对比
MD05-2904 数据来自参考文献 [18-19]。

Fig.4 Comparison of foraminifer oxygen isotope among Core SCSF 39, SCSF41 and Core 17940 foraminifer oxygen isotope data of MD05-2904 is derived from ref. [18] and ref. [19].

仪进行测试, 测试范围 0.02~2 000 μm , 粒径分辨率为 0.01 Φ , 相对误差小于 2%。根据福柯分类标准^[20], 黏土粒径大于 8 Φ (小于 4 μm), 粉砂粒径 4~8 Φ (4~

63 μm), 砂粒径小于 4 Φ 大于(大于 63 μm)。两个重力柱的有孔虫氧碳同位素、沉积物地球化学元素和粒度测试均在广州海洋地质调查局实验测试中心完成。

3 结果

根据上述年龄框架, 对比 SCSF39 和 SCSF41 站位与南海 MD05-2904 站位氧同位素曲线^[18-19], 发现 3 个站位有孔虫氧同位素曲线在全新世、MIS2 期和 MIS3 期变化一致(图 4), 表明 SCSF39 和 SCSF41 的年龄框架具有较高的可信度。MD05-2904 站位(20°27.6'N、116°15'E)位于南海北部陆坡, 水深 2066 m, 地层记录详细。它与 SCSF39 和 SCSF41 站位距离较近, 且沉积环境较为相似, 对后者具有较好的参照意义。

柱状样 SCSF39 和 SCSF41 主要元素的垂向分布显示(图 5), $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值变化基本同步; $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 Sr/Al 比值变化与之相反。MIS3 时期(35~29 kaBP) $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 处于相对高值, $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 Sr/Al 处于相对低值; MIS2 时期(29~11.7 kaBP) $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 较 MIS3 期有所升高; 早全新世(11.5~8.5 kaBP), $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值下降尤为突出, 出现极低值; 在全新世中期(8.5 kaBP 左右)后 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值慢慢升高, 出现小幅波动, $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 Sr/Al 在全新世呈现锯齿小幅波动, 比值整体上呈现较 MIS2 期高。

重力柱状样 SCSF39 和 SCSF41 粒度特征的分布分析发现(图 6), 两柱以粉砂(4~64 μm)为主, 黏土(<4 μm)含量次之, 砂(>64 μm)的含量最少。SCSF39 柱粉砂含量从 MIS3 期下降至全新世早期出现最低值, 之后含量升高, 黏土变化趋势与之相反, 砂含量波动较大, 没有明显的趋势, 平均粒径受粉砂含量影响明显, MIS2 期相对较细, 全新世平均粒径呈现变粗的趋势; SCSF41 柱粉砂含量在 MIS2 期呈现小幅波动, 在全新世中期含量升高, 黏土变化趋势相反, 砂含量波动明显, MIS2 期波动较大, 平均粒径变化幅度很小。

4 讨论

4.1 冰期间冰期海平面变化对陆坡沉积物组分的影响

南海北部陆坡基本处在 CCD 以上, 为典型的半

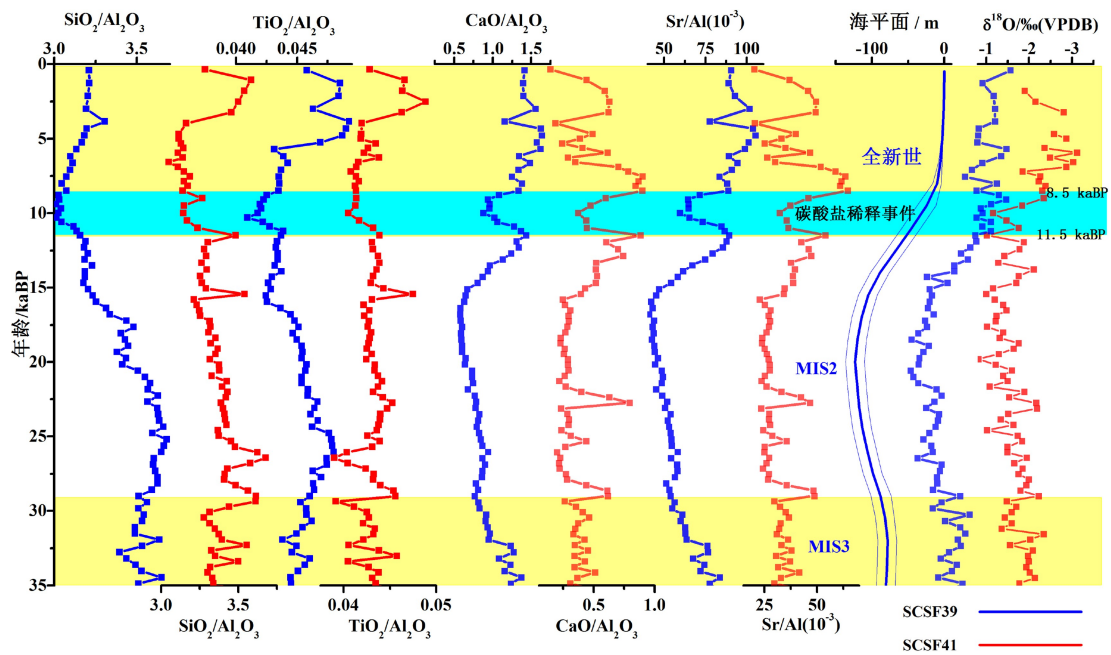


图5 SCSF39 站位和 SCSF41 站位地球化学元素比值分布特征
 Fig.5 Geochemical characteristics of the Core SCSF39 and SCSF41

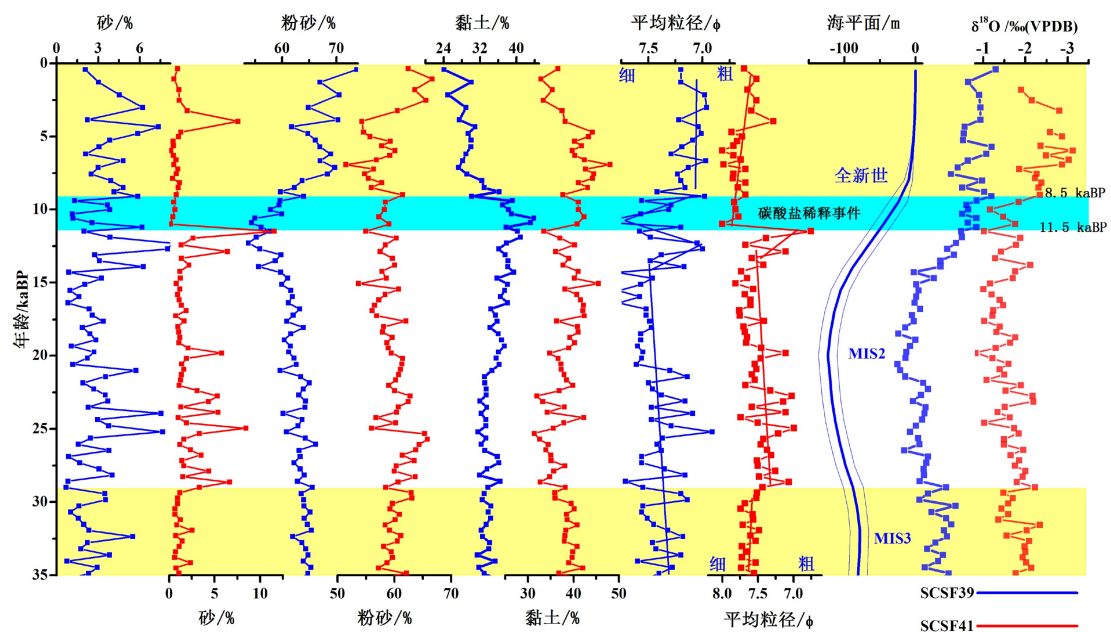


图6 SCSF39 站位和 SCSF41 站位粒度分布特征
 Fig.6 Grain size distributions of the Core SCSF39 and SCSF41

远洋沉积: 由陆源物质与生源物质共同组成, 包含黏土质粉砂、粉砂质黏土以及钙质软泥等多种沉积物类型 [8, 21, 22]。Zhao 等 [22] 对北部陆坡的成分开展了详细的研究, 发现陆源碎屑的含量为 59%~82%, 碳酸盐为 15%~38%, 蛋白石和有机质分别为 1.6%~2.9% 和 0.7%~1.4%。基本以陆源碎屑和碳酸盐沉积物为主。前人 [23-25] 对主量元素的指示意义做了较为系统的研究, 认为 SiO₂ 通常赋存于石英碎屑和其他硅酸盐碎屑等陆源碎屑中, TiO₂ 元素化学性质稳定, 风

化后难以形成可溶性的化合物, 两者都是较好的陆源碎屑组分指标, CaO 为生物沉积碳酸盐的主要成分, 为海洋自生的钙质生物碎屑代用指标。此外, 有研究指出 Sr 和 Ca 类似, 主要赋存于海洋生物贝壳类残骸中, 同样对生物碎屑组分具有较好的指示意义 [26]。

图 5 显示, 以 SiO₂/Al₂O₃ 和 TiO₂/Al₂O₃ 代表的陆源物质含量和以 CaO/Al₂O₃ 和 Sr/Al 代表的海洋生物碎屑物质组分呈现较为明显的反相关关系。陆

源物质增加的时候海洋钙质生物组分呈现下降的趋势, 海洋钙质生物组分升高的时期陆源物质组分也呈现下降的趋势。全新世和 MIS3 时期, 陆源物质含量较低, 而海洋钙质生物碎屑组分含量相对较高; 而在 MIS2 期海洋生物碎屑物质含量较低, 陆源碎屑物质含量较高。

陆源物质和海洋生物碎屑物质含量的变化与海平面变化较为一致, 表现为低海平面时, 陆源物质含量增加, 海平面高时生物碎屑物质含量增加^[27]。Zhao 等^[22]认为冰期时南海北部大陆架海平面下降幅度高达 120 m, 按照这个高度计算, 陆源物质从最近的陆地搬运到研究站位的距离缩短近一半。另外, 宽阔的大陆架成为新的物源区, 同样产生大量的陆源碎屑物质。陆源碎屑物质的增多, 稀释了海洋生物碎屑组分, 使得冰期时 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 增大, 间冰期时 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 Sr/Al 增大。

位于不同深度的 SCSF39 站位和 SCSF41 站位在陆源物质/海洋生物碎屑物质变化幅度方面有轻微的差别。SCSF39 站位位于陆坡中部, 水深相对较浅, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 变化幅度相对较强, 而 SCSF41 站位位于陆坡和深海海盆交界处, 水深相对较深, 其 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 变化幅度相对较小。Huang 等^[13]在南海“碳酸盐稀释事件”的研究中已有发现, 陆坡深水区的站位较陆坡浅水区站位的碳酸盐亏损值小。本研究证实该结论: 水深较浅的站位距离源区更近, 受到海平面升降对陆源物质的供给控制更为显著, 而水深较深的站位, 距离物源更远, 海平面变化影响陆源物质供给较为有限。因此, 冰期间冰期海平面变化对水深较浅的站位影响更为显著, 对水深较深的站位影响较小。

4.2 全新世初期东亚夏季风增强在沉积记录中的响应

东亚夏季风是研究区域重要的强迫因子之一, 它对陆坡区域沉积环境的影响是间接的, 通过改变物源区域来影响沉积环境, 最明显的标志是 SCSF39 和 SCSF41 两个站位记录的“碳酸盐稀释事件”。前人对南海北部沉积物物源做了大量的工作, 认为该区域沉积物主要来自台湾和吕宋地区, 经表层和深水洋流搬运沉积而来^[2, 3, 12, 13]。Huang 等^[13]收集了南海 40 个站位的沉积记录, 发现在全新世初期(11.5~8.5 kaBP), 南海北部陆坡沉积物中出现碳酸盐组分亏损事件, 在综合了大量资料的基础上提出, 全新世初期全球变暖, 西太暖池海洋表层温度升高, 生成强台风数目增加, 这些台风导致台湾岛水土流失

加剧, 形成大量的陆源碎屑, 并随洋流和中尺度涡扩散至南海北部, 陆源物质的大量增加稀释了沉积物中的碳酸盐组分, 形成了“碳酸盐稀释事件”。

SCSF39 和 SCSF41 站位元素地球化学记录(图 5)及沉积物粒度特征记录(图 6)中均记录到该事件, 在 11.5~8.5 kaBP, 两个站位 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 Sr/Al 出现不同程度的下降(图 5), 位于陆坡上部的 SCSF39 站位表现更加强烈, 在该站位粉砂含量急剧增加, 平均粒径变细(图 6)。结合 SCSF39 和 SCSF41 站位地球化学元素和粒度数据, 本研究赞同 Huang 等^[13]的观点, 即全新世初期由于台风事件增强来自台湾地区陆源物质总量增加, 但海平面上升淹没了台湾以西至中沙地区大片的浅海地区, 使陆源碎屑沉积物的搬运距离更远, 虽然陆源物增加, 但沉积物颗粒却变细。

$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 及 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 Sr/Al 比值变化特征在 MIS2 和全新世中后期反映的是海平面的影响, 如在夏季风最弱的 MIS2 时期陆源碎屑含量反而较高, 在夏季风最强的 MIS3 和全新世时期陆地风化作用最强, 而陆源碎屑含量反而最低, 这些特征表明东亚夏季风对陆坡沉积环境的影响要小于海平面升降的影响。但除了影响物源, 东亚夏季风是否对中层流和深层流产生影响, 需要做更深入的工作。

5 结论

南海陆坡衔接陆架和深海海盆, 地形复杂, 影响因素繁多。本文对南海陆坡中部和底部的两个重力柱开展了元素地球化学和粒度分析, 发现海平面和东亚夏季风对陆坡沉积环境影响十分显著:

冰期间冰期海平面变化控制陆坡陆源碎屑物质/深海钙质碎屑组成, 影响沉积物中地化元素的比例, 冰期时陆源物质沉积物增加, 重力柱中 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值升高, 间冰期时陆源碎屑物质减少, 重力柱中 $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 Sr/Al 比值升高;

研究区域地层在全新世初期(11.5~8.5 kaBP)出现“碳酸盐稀释事件”, $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 Sr/Al 比值呈现低值, 可能与东亚夏季风增强和台风增多有关, 降水作用增加导致陆源物质大量增加, 稀释了沉积物中的生源组分。

致谢: 本文的研究材料由 2015 年中德联合科考航次提供, 感谢参与此航次的全体科考人员和海洋四号全体船员。德国莱布尼茨波罗的海海洋研

究所 (IOW) Joanna Waniak 教授, 广州海洋地质调查局王玉凤、胡梦茜, 华南师范大学地理科学学院李明坤老师, 河海大学海洋学院吴琼老师, 自然资源部第三海洋研究所赵绍华老师在研究中提供了大量的帮助和建议, 同济大学黄恩清老师提供了大量指导和重要的科学数据, 两位匿名审稿人提供重要的意见和建议, 在此表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] Milliman J D, Farnsworth K L. River Discharge to the Coastal Ocean: A Global Synthesis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011: 1-382.
- [2] Liu Z F, Zhao Y L, Colin C, et al. Source-to-sink transport processes of fluvial sediments in the South China Sea [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 238-273.
- [3] Zhang Y W, Liu Z F, Zhao Y L, et al. Mesoscale eddies transport deep-sea sediments [J]. *Scientific Reports*, 2015, 4: 5937.
- [4] 舒业强, 王强, 姐婷婷. 南海北部陆架陆坡流系研究进展[J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, 61(5): 560-571. [SHU Yeqiang, WANG Qiang, ZU Tingting. Progress on shelf and slope circulation in the northern South China Sea [J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, 61(5): 560-571.]
- [5] 赵绍华, 刘志飞, 陈全, 等. 南海北部末次冰期以来深水沉积物组成及其堆积速率的时空变化特征[J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, 60(7): 1368-1381. [ZHAO Shaohua, LIU Zhifei, CHEN Quan, et al. Spatiotemporal variations of deep-sea sediment components and their fluxes since the last glaciation in the northern South China Sea [J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 60(7): 1368-1381.]
- [6] Becker J J, Sandwell D T, Smith W H, et al. Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30_PLUS [J]. *Marine Geodesy*, 2009, 32(4): 355-371.
- [7] 姚伯初. 南海海盆新生代的构造演化史[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1996, 16(2): 1-13. [YAO Bochu. Tectonic evolution of the South China Sea in cenozoic [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1996, 16(2): 1-13.]
- [8] Wang P X, Li Q Y. The South China Sea: Paleoceanography and Sedimentology[M]. Netherlands: Springer, 2009: 1-497.
- [9] 刘丛舒, 丁巍伟, 殷绍如, 等. 南海北部陆坡区海底峡谷地貌、沉积特征及控制因素[J]. *海洋学研究*, 2019, 37(2): 28-43. [LIU Congshu, DING Weiwei, YIN Shaoru, et al. Geomorphology, sedimentary characteristics and controlling factors of submarine canyons in the northern continental slope of the South China Sea [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2019, 37(2): 28-43.]
- [10] 俞慕耕, 刘金芳. 南海海流系统与环流形势[J]. *海洋预报*, 1993, 10(2): 13-17. [YU Mugeng, LIU Jinfang. Ocean current system and ocean current situation in the South China Sea [J]. *Marine Forecasts*, 1993, 10(2): 13-17.]
- [11] 苏纪兰. 南海环流动力机制研究综述[J]. *海洋学报*, 2005, 27(6): 1-8. [SU Jilan. Overview of the South China Sea circulation and its dynamics [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2005, 27(6): 1-8.]
- [12] Liu Z Q, Gan J P. Three-dimensional pathways of water masses in the South China Sea: A modeling study [J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2017, 122(7): 6039-6054.
- [13] Huang E Q, Tian J, Qiao P J, et al. Early interglacial carbonate-dilution events in the South China Sea: Implications for strengthened typhoon activities over subtropical East Asia [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 125: 61-77.
- [14] Ge Q, Chu F Y, Xue Z, et al. Paleoenvironmental records from the northern South China Sea since the Last Glacial Maximum [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 29(3): 46-62.
- [15] Wang L J, Sarnthein M, Grootes P M, et al. Millennial reoccurrence of century-scale abrupt events of East Asian Monsoon: A possible heat conveyor for the global deglaciation [J]. *Paleoceanography*, 1999, 14(6): 725-731.
- [16] 范维佳, 陈荣华. 南海北部5万年来的表层海水盐度及东亚季风降水[J]. *第四纪研究*, 2011, 31(2): 227-235. [FAN Weijia, CHEN Ronghua. Sea Surface salinity and east Asian monsoon precipitation since the last 50000 years in the northern South China Sea [J]. *Quaternary Sciences*, 2011, 31(2): 227-235.]
- [17] 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 [J]. *Marine Geology*, 1999, 156(1-4): 245-284.
- [18] 郑洪波, 陈国成, 谢昕, 等. 南海晚第四纪陆源沉积: 粒度组成、动力控制及反映的东亚季风演化[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(3): 414-424. [ZHENG Hongbo, CHEN Guocheng, XIE Xin, et al. Grain size distribution and dynamic control of late Quaternary terrigenous sediments in the South China Sea and their implication for East Asian monsoon evolution [J]. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(3): 414-424.]
- [19] Liu Z F, Li X J, Colin C, et al. A high-resolution clay mineralogical record in the northern South China Sea since the Last Glacial Maximum, and its time series provenance analysis [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(35): 4058-4068.
- [20] Folk R L, Andrews P B, Lewis D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand [J]. *New Zealand Journal of Geology & Geophysics*, 1970, 13(4): 937-968.
- [21] 汪品先. 十五万年来的南海: 南海晚第四纪古海洋学研究阶段报告[M]. 上海: 同济大学出版社, 1995: 1-172. [WANG Pinxian. The Past 150 kyr of the South China Sea: A Periodic Report on the Late Quaternary Paleoceanography Research of the South China Sea[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1995: 1-172.]
- [22] Zhao S H, Liu Z F, Colin C, et al. Responses of the East Asian Summer Monsoon in the low-latitude South China Sea to high-latitude millennial-scale climatic changes during the last glaciation: Evidence from a high-resolution clay mineralogical record [J]. *Paleoceanography and Paleoclimatology*, 2018, 33(7): 745-765.
- [23] 石学法, 刘升发, 乔淑卿, 等. 东海闽浙沿岸泥质区沉积特征与古环境记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(4): 19-30. [SHI Xuefa, LIU Shengfa, QIAO Shuqing, et al. Depositional features and palaeoenvironmental records of the mud deposits in Min-Zhe Coastal Mud Area, East China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary*

- Geology, 2010, 30(4): 19-30.]
- [24] 刘升发, 石学法, 刘焱光, 等. 东海内陆架泥质区表层沉积物常量元素地球化学及其地质意义[J]. *海洋科学进展*, 2010, 38(1): 80-86. [LIU Shengfa, SHI Xuefa, LIU Yanguang, et al. Geochemical characteristics and geological significance of major elements in the surface sediments from the inner shelf mud area of the East China Sea [J]. *Advances in Marine Science*, 2010, 38(1): 80-86.]
- [25] 肖尚斌, 陈木宏, 陆钧, 等. 南海北部陆架柱状沉积物记录的残留沉积[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(3): 1-5. [XIAO Shangbin, CHEN Muhong, LU Jun, et al. New evidence for remnant deposits recorded by columnar sediments in the shelf of the Northern South China Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(3): 1-5.]
- [26] 田景春, 张翔. 沉积地球化学[M]. 北京: 地质出版社, 2016: 1-196. [TIAN Jingchun, ZHANG Xiang. *Sedimentary Geochemistry* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016: 1-196.]
- [27] Waelbroeck C, Labeyrie L, Michel E, et al. Sea-level and deep water temperature changes derived from benthic foraminifera isotopic records [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2002, 21(1-3): 295-305.