

文章编号: 1000-0550(2010)06-1198-08

近4400年来南海北部陆架沉积地球化学记录及其地质意义^①

徐方建¹ 陈世悦¹ 操应长¹ 陈木宏² 李安春³ 肖尚斌²

(1. 中国石油大学(华东)地球资源与信息学院 山东青岛 266555; 2. 中国科学院边缘海地质重点实验室 南海海洋研究所 广州 510301; 3. 中国科学院海洋研究所 海洋地质与环境重点实验室 山东青岛 266071)

摘要 对位于海南岛南部陆架的S20孔沉积物进行了沉积学、AMS¹⁴C年代、粒度和常微量元素分析,初步探讨了该区物质来源及蕴含的亚洲季风演化信息。近4400 a以来,S20孔岩性较均一,其沉积作用受相对单一而稳定的水动力条件控制。S20孔沉积物源区物质硅酸盐矿物经历了明显的风化,A—CN—K图示和较低的CIA值(小于66)指示了源区较低的化学风化程度。海南岛东部河流和珠江物质是最为可能影响S20孔区域的两个来源,由于对海南岛河流物质的研究相当匮乏,本研究尚无法定量估算这两个可能物质来源的各自贡献。S20孔沉积物CIA、Al₂O₃/Na₂O、CaO^{*}/TiO₂、Na₂O/TiO₂等变化主要反映的是源区物质风化程度变化,该孔沉积物源区化学风化程度自4400~1600 a BP逐渐减弱以及1600 a BP以来的逐渐增强,与中国南部Dongge洞石笋氧同位素曲线记录的亚洲夏季风变化趋势对应良好,说明该区沉积物中蕴含了丰富的亚洲季风变化信息。S20孔沉积物揭示出的化学风化程度强弱可能主要受控于轨道时间尺度上北半球夏季太阳辐射量变化。南海陆架区沉积物中物源与季风演化等信息的提取,亟待更多更高精度研究工作的展开。

关键词 陆架 南海 物质来源 亚洲季风

第一作者简介 徐方建 男 1982年出生 博士 讲师 海洋沉积与矿物学 E-mail: xufangjiang@163.com; xufj@upc.edu.cn

中图分类号 P512.32 **文献标识码**

近海陆架沉积有效的记录了海陆变迁、海平面变化、河流入海和气候变化等地质与环境信息,对全球环境变化十分敏感,因此陆架沉积研究特别是中国陆架沉积研究备受关注^[1~5]。近年来对渤海^[6,7]、黄海^[4,8,9]、东海^[10~13]、南海陆架^[5]等各海区沉积物进行了研究,在区域沉积物的平面分布^[4,13~15]、地球化学特征与物质来源^[1,5,10,11,16]、沉积演化历史及其古气候、季风演化信息的提取^[2,3,9,17~20]等方面取得了较大发展。南海作为东亚大陆物质剥蚀的主要沉积区,已经开展了大量的工作,然而研究重点集中于深水区^[21~24],对南海陆架的研究则要远远滞后^[25~27]。本文对位于海南岛南部的S20孔粒度、年代以及常、微量元素数据进行综合分析,初步探讨了该区物质来源及其可能蕴含的亚洲季风变化信息。

1 材料与方法

海南岛及其邻近海区有诸多河流注入南海,海南岛东岸环流也存在季节性变化特点,即夏季由于盛行

西南风而为东北向流,冬季盛行东北风而盛行西南向流^[27,28](图1)。研究所用的S20孔(110°03.22'E, 17°41.57'N)位于海南岛南部,为2003年9月获取,长222 cm,水深127.3 m。整个岩芯以灰色、深灰色粘土质粉砂为主,未见明显的事件沉积。粒度和化学分析取样间隔均为10 cm,分析样品共23个。

粒度分析样品先后用过量双氧水($\phi=30\%$)和盐酸(3 N)处理。处理后的样品在中国科学院南海海洋研究所用英国Malvern 2000型激光粒度仪进行粒度测量,测量范围为0.02~2000 μm ,测试误差小于2%。

样品洗盐后在恒温(60℃)下烘干,研磨至小于250目,送中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所进行测试。多数常微量元素分析用全自动X-射线荧光光谱仪分析,仪器型号为PW2440,由荷兰飞利浦公司生产。元素La分析用ICP-MS方法测定,仪器型号为POEMS3,由美国热电公司生产。为了监控测试精度和准确度,进行了若干样品的重复分

^① 中国石油大学博士基金(批准号:Y0901036)资助。
收稿日期:2009-08-27; 收修改稿日期:2009-12-01

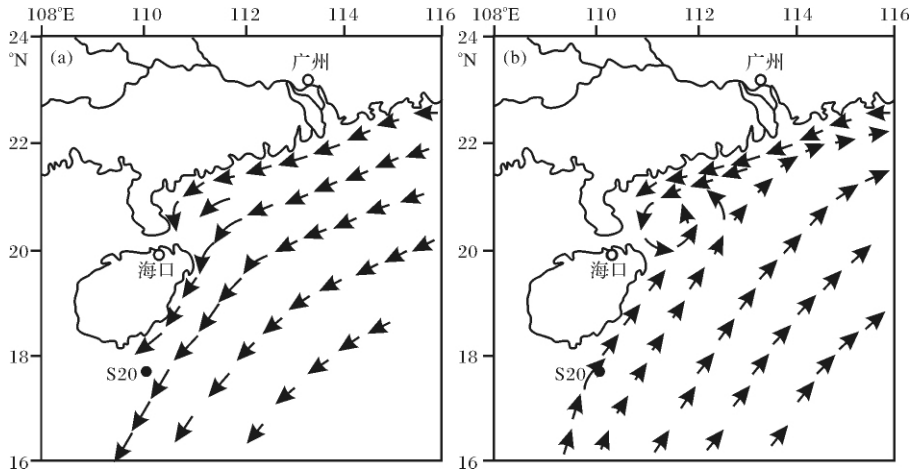


图 1 南海北部季节性流系路径和站位图(据陈丽蓉等^[27]) (a) 2 月份 (b) 8 月份
Fig. 1 Seasonal current variations in northern South China Sea and core location

析与标样分析, 标样类型为国家一级标准物质 GSD-9 和 GSD-10, 重复样与一级标准物质合格率均为 100%。分析项目以及技术指标见质量报告(表 1)。取 0.10 ~ 0.20 g 用上述方法处理的样品送中国地质调查局海洋地质实验监测中心, 采用原子吸收分光光度计测定碳酸钙含量, 仪器型号为美国热电公司 M6 型。

表 1 S20 孔地球化学分析质量报告

Table 1 Detection limit of geochemical compositions in Core S20

分析项目	检出限	单位	分析项目	检出限	单位
CaO、Na ₂ O、K ₂ O	0.05	%	Cr	5	μg/g
Al ₂ O ₃	0.2	%	Zr	2	μg/g
TiO ₂	10	μg/g	Th、Sc、La	1	μg/g

3 个 AMS¹⁴C 年代数据在中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室完成, 原始测年数据利用 CALIB 5.0.1 软件^[29]进行日历年龄校正(表 2), 其他深度年代数据通过内插或是外推获得(本文所指的年龄均为日历年龄)。

表 2 S20 孔 AMS¹⁴C 年龄数据

Table 2 AMS¹⁴C dating of Core S20

深度/cm	材料	AMS ¹⁴ C 年龄/a BP	日历年龄/a BP(1σ)
68 ~ 70		2662 ± 41	2354(2301 ~ 2406)
138 ~ 140	混合种有孔虫	3398 ± 25	3281(3240 ~ 3322)
200 ~ 210		4082 ± 21	4118(4074 ~ 4162)

2 岩性特征

从图 2 可以看出, S20 孔岩性较均一, 主要为粘土质粉砂, 其中粘土、粉砂和砂平均含量大约分别为

16%、71% 和 13%。从底部向上, 平均粒径总体表现为逐渐变细, 粒度频率曲线分布多数近于对数正态分布, 表明其沉积作用受相对单一而稳定的水动力条件控制。

年龄测试表明, 该泥质区在约 4 400 aBP(外推年龄)前已经开始形成(表 2), 4 118 ~ 2 354 a BP 期间沉积速率较为稳定, 约为 77 cm/ka, 2 354 a BP 以来沉积速率明显降低, 约为 29 cm/ka。

3 化学风化特征

3.1 A—CN—K 图

S20 孔沉积物样品以几乎与 A—CN 线平行的趋势向 A—K 边靠近, 而远离斜长石—钾长石基线(图 3), 反映出源区物质化学风化时硅酸盐矿物(如长石)也经历了一定的风化, 斜长石的脱 Ca 和 Na 过程明显, 而钾长石风化很弱, 脱 K 不明显, 沉积物多位于低等化学风化程度区, 化学风化产物以伊利石和蒙脱石等为主。

3.2 化学风化指数 CIA

化学风化指数 CIA 由 Nesbitt 和 Young^[30]提出, 其定义如下:

$$CIA = \frac{Al_2O_3}{Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O} \times 100$$

式中各氧化物均为摩尔数, CaO* 表示样品硅酸盐中的 CaO, 用总 CaO 扣除碳酸盐(均视为 CaCO₃ 矿物)中的 CaO, 计算公式为: CaO* = CaO - CaCO₃ × 40/100。由于 CIA 主要反映的是硅酸盐矿物(主要是长石矿物)的风化, 不存在元素迁移后再沉积的情

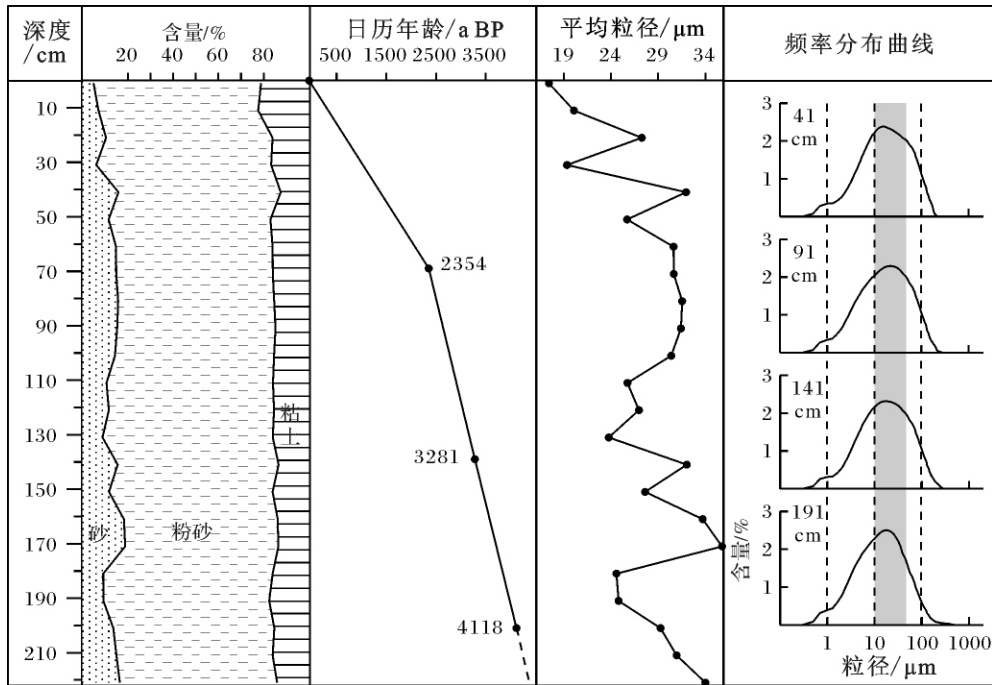


图2 S20孔岩性剖面、年代地层与粒度频率分布曲线

Fig. 2 Chronology, grain-size parameter and frequency distributions of Core S20

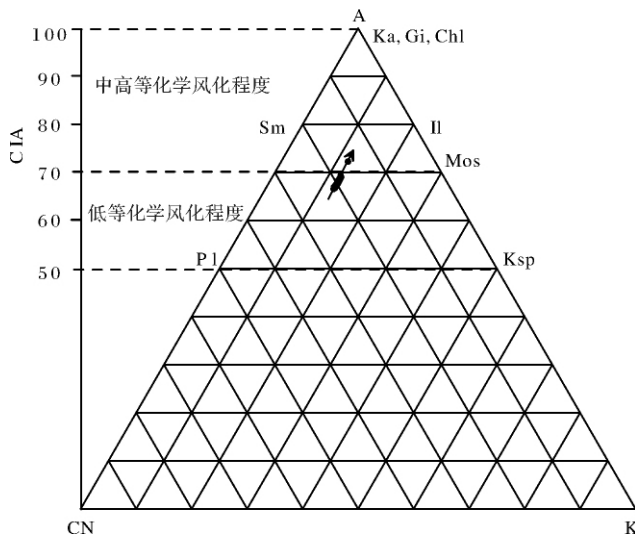


图3 S20孔A—CN—K三角图

Ka: 高岭石; Gi: 水铝石; Chl: 绿泥石; Sm: 蒙脱石;
 Il: 伊利石; Mos: 白云母; Pl: 斜长石; Ksp: 钾长石;
 A: Al_2O_3 ; CN: $CaO + Na_2O$; K: K_2O

Fig. 3 A—CN—K Plot of Core S20

况,因此很好的反映了沉积物形成时的化学风化情况而不是后期环境变化,因而在化学风化研究中得到了广泛运用^[30,31]。由于未风化的长石CIA为50,伊利石和蒙脱石为75~85,高岭石和绿泥石则接近100^[30,31],而S20孔沉积物CIA均小于66,由此可见,

该孔CIA值较低,指示其化学风化程度较低。在其形成时,除了碳酸盐矿物经历了较强的化学风化外,部分硅酸盐矿物如斜长石也经历了一定的化学风化作用,导致部分Ca的迁移,其风化产物可能主要以伊利石和蒙脱石为主。

4 物质来源

研究表明,海南岛以东的南海北部地区主要受珠江、韩江和台湾岛输入物质的影响,红河来源的沉积物由于海南岛的阻隔和科氏力的作用,很难搬运到海南岛以东地区^[32]。珠江年输沙量约 82.78×10^6 t,而韩江径流量仅为珠江的十分之一,年输沙量仅约 7×10^6 t,而且以伶仃洋和东沙岛两点连线,珠江源区主要影响该线西南区域,而闽粤沿海源区以及台湾岛源区主要影响伶仃洋—东沙群岛连线东北区域^[32]。邵磊等^[32]提及,在珠江三角洲以西至雷州半岛,由于常年受沿岸流由东向西搬运的影响,该区域沉积物主要受珠江三角洲物源的控制^[33],并指出海南岛对该区域影响如何尚缺乏相关资料,是一个亟待研究解决的问题。

海南岛河流众多,河系受穹隆构造影响自中央向四周辐射奔流入海。岛上河流共有200余条,其中流域面积 100 km^2 以上独流入海的河流40条,流域面积

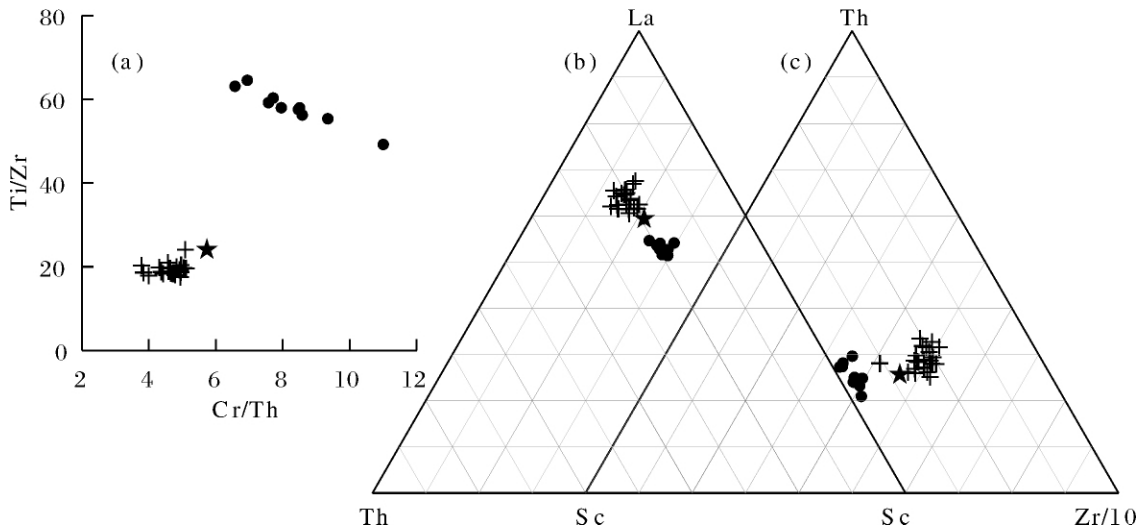


图 4 (a) S20 孔 Ti/Zr - Cr/Th 图; (b) La - Th - Sc 图; (c) Th - Sc - Zr/10 图

图中十字形代表 S20 孔沉积物样品, 圆圈代表 ODP1148 站沉积物样品^[22], 五角星代表珠江物质^[28]

Fig. 4 (a) Ti/Zr - Cr/Th plot; (b) La - Th - Sc plot; (c) Th - Sc - Zr/10 plot

在 3 000 km² 以上的河流, 有南渡江、昌化江和万泉河。陈丽蓉^[27] 通过对碎屑矿物(63 ~ 250 μm) 的研究认为, 海南岛以东以及以南的近岸区主要为沿岸冲刷及沿岸河流带来的, 对粘土矿物分区研究则表现出海南岛东部以及南部与珠江口沉积物相似。因此, 排除红河、台湾和韩江等的影响, 考虑到地形和流系因素, 海南岛东部河流和珠江物质是影响 S20 孔区域最为可能的两个来源。

以往研究认为, 近 23 Ma 以来 ODP1148 站沉积物主要来源于珠江(华南)^[32, 34, 35], 为此, 选择 ODP1148 站沉积物^[22]、珠江物质^[28] 与 S20 孔沉积物进行对比。可以发现, S20 孔沉积物各项指标比 ODP1148 站更接近珠江物质(图 4)。这可能是由于以下原因造成的: (1) 搬运动力和沉积环境差异造成的分选差异, 两站位距离珠江河口的距离大致相当, 但是 S20 孔物质可能主要受到沿岸流携带物质沿着水深大约 100 m 的陆架搬运, 而 ODP1148 站物质则经历了河口—陆架—陆坡—海盆的近 3 300 m 落差, 这一差异也会造成两站位物质组成和粒度的明显差异, 即 1148 站的物质粒度更细, 而 S20 孔物质会较粗, 由于珠江物质的选取为在不同地区按照不同沉积物类型(砂、粉砂、泥)组成的组合样^[28], 相对来讲后者更倾向于与珠江物质相近; (2) S20 孔与珠江物质的地球化学成分相近可能是由于海南岛区域物质与珠江流域物质具有相似的地球化学背景, 二者具有相似的物质以及地球化学组成。由于对海南岛河流物

质的研究相当匮乏, 本研究尚无法定量估算该两个可能物质来源的各自贡献。

5 近 4 400 年来化学风化演化

在岩石的风化过程中, 比较活泼的 Na、Ca 等碱金属和碱土金属元素很容易被淋滤出来, 而 Al、Ti 等不活泼元素则在风化产物中富集^[22, 30, 36], 因此沉积物源区化学风化程度的变化是引起风化产物化学成分变化的重要因素。由于搬运水力条件变化而产生的沉积物粒度差别也能导致沉积物的化学成分差异, 即绝大多数地球化学成分变化符合“元素的粒度控制律”^[28], 近期研究认为, 元素含量变化主要反映的是矿物种类和含量变化信息, 粒度的作用是间接的^[37~39], 而相应的元素比值也可弱化或是消除粒度的影响^[22, 36, 40]。

对比 S20 孔沉积物平均粒径和 CIA、Al₂O₃/Na₂O、CaO^{*}/TiO₂、Na₂O/TiO₂ 等的变化(图 2、图 5), 将该 5 组数据进行 Spearman 相关分析, 平均粒径与后 4 组参数在 $\alpha = 0.01$ (置信度 $P = 0.99$) 时, 均未表现出相关性, 在 $\alpha = 0.05$ (置信度 $P = 0.95$) 时, CaO^{*}/TiO₂、CIA 分别与平均粒径表现为低度正 ($R = 0.49$)、负相关 ($R = -0.45$)。这可能是由于样品未去除生物碳酸盐, 在硅酸盐 CaO^{*} 含量计算过程中, 一定程度上受到相对较粗粒生物碳酸盐的影响, CIA 与平均粒径表现出的低度负相关, 则是受到了计算过程中 CaO^{*} 含量的影响。纵然如此, 较低的置信度和相关

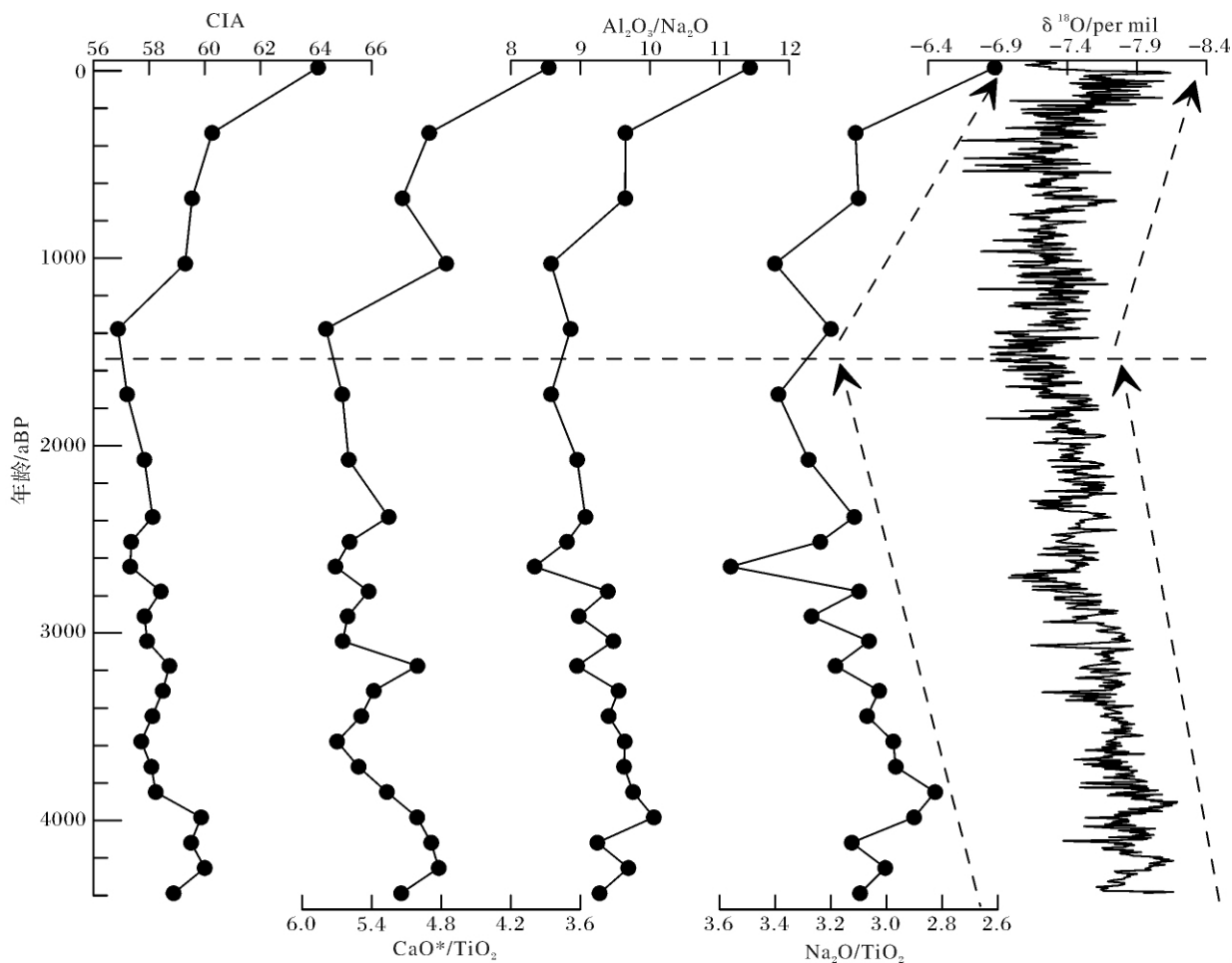


图5 S20孔CIA、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}^*/\text{TiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ 与Dongge洞石笋氧同位素曲线^[41]对比

Fig. 5 Vertical distributions of CIA, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$, $\text{CaO}^*/\text{TiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ of Core S20 and comparison with the stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ from Dongge Cave

系数表明,粒度对 $\text{CaO}^*/\text{TiO}_2$ 、CIA 值的影响是有限的。由于 S20 孔可能来自于珠江物质和海南岛区域物质,而二者可能具有相似的物质以及地球化学组成,因此可以认为,该孔沉积物 CIA、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{CaO}^*/\text{TiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ 等变化未(或较少)受到搬运水动力条件影响,而主要反映的是源区物质风化程度变化^[22, 30, 31, 36]。对比图 5 中 $\text{CaO}^*/\text{TiO}_2$ 、CIA 值与 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ 的变化趋势,可以发现前两者的总体变化趋势与后两者相似,这在另一个角度说明 S20 孔沉积物粒度(以及生物碳酸盐)对 $\text{CaO}^*/\text{TiO}_2$ 、CIA 值的影响是有限的。

S20 孔沉积物 CIA 和 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$ 比值表现出自 4 400 ~ 1 600 a BP 逐渐降低,1 600 a BP 至今则逐渐升高, $\text{CaO}^*/\text{TiO}_2$ 、 $\text{Na}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ 比值与其趋势相反(图 5),这表明化学风化程度自 4 400 ~ 1 600 a BP 逐渐

减弱以及 1 600 a BP 以来逐渐增强。与中国南部 Dongge 洞 DA 石笋氧同位素曲线^[41]对比显示,S20 孔沉积物化学风化程度的强弱变化与亚洲夏季风的强弱变化趋势较为一致。

湖北神农架山宝洞 SB10 石笋^[42]与阿曼 Qunf 洞 Q5 石笋^[43]氧同位素变化记录也表明,4 400 a BP 前后不同区域季风降水存在降低的趋势,而且 Q5^[43]和 DA 石笋^[41]记录也显示,在 1 600 a BP 前后,夏季风强度有所回升。王绍武等^[44]的大气环流模式模拟研究表明,中国 4 000 ~ 2 000 a BP 的干旱可能是在岁差的影响下夏季太阳辐射显著下降、夏季风减弱所致。南海陆架 S20 孔沉积物揭示出的化学风化程度强弱与 DA 石笋、SB10 石笋和 Q5 石笋记录的亚洲夏季风变化的相似性表明,在轨道时间尺度上,前者也受控于北半球夏季太阳辐射量变化^[45]。这也说明海南岛南部陆架区具有相对稳定的物质来源或是物源

变化对该区域影响不明显,而且该区沉积物蕴含了丰富的亚洲季风变化信息。

6 结论

(1) 近4400年以来,南海陆架北部S20孔沉积物源区硅酸盐矿物经历了一定的风化作用,斜长石的脱Ca和Na过程明显,钾长石风化很弱,脱K不明显,而且该孔沉积物CIA值较低(均小于66),指示了较低的化学风化程度。

(2) 海南岛东部河流和珠江物质是影响S20孔区域最为可能的两个来源,由于对海南岛河流物质的研究相当匮乏,本研究尚无法定量估算这两个可能物质来源的各自贡献。

(3) S20孔沉积物CIA、 Al_2O_3/Na_2O 、 CaO^*/TiO_2 、 Na_2O/TiO_2 等变化未(或较少)受到搬运水动力条件影响,而主要反映的是源区物质风化程度变化。该类元素比值变化趋势表明S20孔沉积物源区化学风化程度自4400~1600 a BP逐渐减弱,1600 a BP以来逐渐增强,与中国南部Dongge洞石笋氧同位素曲线对应趋势良好,说明该区沉积物中蕴含了丰富的亚洲季风变化信息。南海陆架S20孔沉积物揭示出的化学风化程度强弱可能主要受控于轨道时间尺度上北半球夏季太阳辐射量的变化。

致谢 感谢在南海S20孔岩心取样中全体船员、科考队员的大力配合;中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所、中国地质调查局海洋地质实验监测中心帮助进行了沉积物地球化学成分分析;年代测试由中国科学院黄土与第四纪地质国家重点实验室完成;几位审稿专家提供的宝贵意见和建议使本文得以很大提高,谨致谢忱。

参考文献(References)

- 1 Yang S Y, Jung H S, Lim D I, *et al.* A review on the provenance discrimination of sediments in the Yellow Sea [J]. *Earth-Science Reviews*, 2003, 63: 93-120
- 2 Xiao S, Li A, Liu J P, *et al.* Coherence between solar activity and the East Asian winter monsoon variability in the past 8000 years from Yangtze River-derived mud in the East China Sea [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 237: 293-304
- 3 Liu J, Saito Y, Wang H, *et al.* Sedimentary evolution of the Holocene subaqueous clinoform off the Shandong Peninsula in the Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2007, 236: 165-187
- 4 Yang Z S, Liu J P. A unique Yellow River-derived distal subaqueous delta in the Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2007, 240: 169-176
- 5 Yang S, Yim W W S, Huang G. Geochemical composition of inner shelf Quaternary sediments in the northern South China Sea with implications for provenance discrimination and paleoenvironmental reconstruction [J]. *Global and Planetary Change*, 2008, 60: 207-221
- 6 刘建国, 李安春, 陈木宏, 等. 全新世渤海泥质沉积物地球化学特征 [J]. *地球化学*, 2007, 36(6): 559-568 [Liu Jianguo, Li Anchun, Chen Muhong, *et al.* Geochemical characteristics of sediments in the Bohai Sea mud area during Holocene [J]. *Geochimica*, 2007, 36(6): 559-568]
- 7 Liu J, Li A, Chen M, *et al.* Sedimentary changes during the Holocene in the Bohai Sea and its paleoenvironmental implication [J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28: 1333-1339
- 8 Liu J P, Milliman J D, Gao S, *et al.* Holocene development of the Yellow River's subaqueous delta, North Yellow Sea [J]. *Marine Geology*, 2004, 209: 45-67
- 9 Xiang R, Yang Z, Saito Y, *et al.* Paleoenvironmental changes during the last 8400 years in the southern Yellow Sea: Benthic foraminiferal and stable isotopic evidence [J]. *Marine Micropaleontology*, 2008, 67: 104-119
- 10 郭志刚, 杨作升, 曲艳慧, 等. 东海陆架泥质区沉积地球化学比较研究 [J]. *沉积学报*, 2000, 18(2): 284-289 [Guo Zhigang, Yang Zuosheng, Qu Yanhui, *et al.* Study on comparison sedimentary geochemistry of mud area on East China Sea continental shelf [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(2): 284-289]
- 11 杨作升, 范德江, 郭志刚, 等. 东海陆架北部泥质区表层沉积物碳酸盐粒级分布与物源分析 [J]. *沉积学报*, 2002, 20(1): 1-6 [Yang Zuosheng, Fan Dejiang, Guo Zhigang, *et al.* Distribution of the carbonate clast size and the provenance analyses of the surface sediments in the northern East China Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(1): 1-6]
- 12 向荣, 杨作升, Saito Y, 等. 济州岛西南泥质区近2300 a来环境敏感粒度组分记录的东亚冬季风变化 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(7): 654-662 [Xiang Rong, Yang Zuosheng, Saito Y, *et al.* East Asia Winter Monsoon changes inferred from environmentally sensitive grain-size component records during the last 2300 years in mud area southwest off Cheju Island, ECS [J]. *Science in China: Series D*, 2006, 49(6): 604-614]
- 13 Liu J P, Xu K H, Li A C, *et al.* Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea [J]. *Geomorphology*, 2007, 85: 208-224
- 14 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等. 东海地质 [M]. 北京: 科学出版社, 1987: 1-290 [Qin Yunshan, Zhao Yiyang, Chen Lirong, *et al.* *Geology of the East China Sea* [M]. Beijing: Science Press, 1987: 1-290]
- 15 Liu J P, Li A C, Xu K H, *et al.* Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea [J]. *Continental Shelf Research*, 2006, 26: 2141-2156
- 16 赵一阳, 鄢明才, 李安春, 等. 中国近海沿岸泥的地球化学特征及其指示意义 [J]. *中国地质*, 2002, 29(2): 181-185 [Zhao Yiyang, Yan Mingcai, Li Anchun, *et al.* Geochemistry of muds along the coast of China and their significance [J]. *Geology in China*, 2002, 29(2): 181-185]

- 17 肖尚斌, 李安春, 蒋富清, 等. 近 2ka 来东海内陆架的泥质沉积记录及其气候意义[J]. 科学通报, 2004, 49(21): 2233-2238 [Xiao Shangbin, Li Anchun, Jiang Fuqing, *et al.* Recent 2000-year geological records of mud in the inner shelf of the East China Sea and their climatic implications[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(5): 466-471]
- 18 徐方建, 李安春, 万世明, 等. 东海内陆架泥质区中全新世环境敏感粒度组分的地质意义[J]. 海洋学报, 2009, 31(3): 95-102 [Xu Fangjian, Li Anchun, Wan Shiming, *et al.* The geological significance of environmental sensitive grain-size populations in the mud wedge of the East China Sea during the mid-Holocene[J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(3): 95-102]
- 19 张晓东, 许淑梅, 翟世奎, 等. 东海内陆架沉积气候信息的端元分析模型反演[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(2): 25-32 [Zhang Xiaodong, Xu Shumei, Zhai Shikui, *et al.* The inversion of climate information from the sediment of inner shelf of East China Sea using end-member model[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2006, 26(2): 25-32]
- 20 徐方建, 李安春, 肖尚斌, 等. 末次冰消期以来东海内陆架古环境演化[J]. 沉积学报, 2009, 27(1): 118-127 [Xu Fangjian, Li Anchun, Xiao Shangbin, *et al.* Paleoenvironmental evolution in the inner shelf of the East China Sea since the last deglaciation[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(1): 118-127]
- 21 Tian J, Wang P, Cheng X. Development of the East Asian monsoon and Northern Hemisphere glaciation: oxygen isotope records from the South China Sea[J]. Quaternary Science Reviews, 2004, 23: 2007-2016
- 22 Wei G, Li X-H, Liu Y, *et al.* Geochemical record of chemical weathering and monsoon climate change since the early Miocene in the South China Sea[J]. Paleoclimatology, 2006, 21: PA4214, doi: 4210.1029/2006PA001300
- 23 Wan S, Li A, Clift P D, *et al.* Development of the East Asian monsoon: Mineralogical and sedimentologic records in the northern South China Sea since 20 Ma[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 254: 561-582
- 24 Sun Y, Wu F, Clemens S C, *et al.* Processes controlling the geochemical composition of the South China Sea sediments during the last climatic cycle[J]. Chemical Geology, 2008, 257: 243-249
- 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 and Quaternary Geology, 2006, 26(3): 1-5]
- 26 张玉兰. 南海北部海域柱状沉积的孢粉、藻类及其古环境意义[J]. 热带海洋学报, 2008, 27(6): 44-48 [Zhang Yulan. Sporopollen and algae in Core C4 of northern South China Sea and its paleoenvironment[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2008, 27(6): 44-48]
- 27 陈丽蓉. 中国海沉积矿物学[M]. 北京: 海洋出版社, 2008: 1-476 [Chen Lirong. Sediment Mineralogy of China Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 2008: 1-476]
- 28 赵一阳, 酈明才. 中国浅海沉积物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 1-200 [Zhao Yiyang, Yan Mingcai. Geochemistry of Sediments in Chinese Shallow Seas[M]. Beijing: Science Press, 1994: 1-200]
- 29 Hughen K A, Baillie M G, Bard E, *et al.* Marine radiocarbon age calibration, 0-26 cal kyr BP[J]. Radiocarbon, 2004, 46(3): 1059-1086
- 30 Nesbitt H W, Young G M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites[J]. Nature, 1982, 299: 715-717
- 31 杨守业, 李从先, 李徐生, 等. 长江下游下蜀黄土化学风化的地球化学研究[J]. 地球化学, 2001, 30(4): 402-406 [Yang Shouye, Li Congxian, Li Xusheng, *et al.* Geochemical records of chemical weathering of the Xiashu Loess in the lower reaches of the Changjiang River[J]. Geochimica, 2001, 30(4): 402-406]
- 32 邵磊, 乔培军, 庞雄, 等. 南海北部近代沉积物钕同位素分布及意义[J]. 科学通报, 2009, 54(1): 98-103 [Shao Lei, Qiao Peijun, Pang Xiong, *et al.* Nd isotopic variations and its implications in the recent sediments from the northern South China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(2): 311-317]
- 33 刘昭蜀, 赵焕庭, 范时清, 等. 南海地质[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 1-502 [Liu Zhaoshu, Zhao Huanting, Fan Shiqing, *et al.* Geology of the South China Sea[M]. Beijing: Science Press, 2002: 1-502]
- 34 Clift P, Lee J I, Clark M K, *et al.* Erosional response of South China to arc rifting and monsoonal strengthening: a record from the South China Sea[J]. Marine Geology, 2002, 184: 207-226
- 35 Li X-H, Wei G, Shao L, *et al.* Geochemical and Nd isotopic variations in sediments of the South China Sea: a response to Cenozoic tectonism in SE Asia[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2003, 211: 207-220
- 36 韦刚健, 刘颖, 邵磊, 等. 南海碎屑沉积物化学组成的气候记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(3): 1-4 [Wei Gangjian, Liu Ying, Shao Lei, *et al.* Climatic records in the major elements of the terrestrial detritus from the South China Sea[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2003, 23(3): 1-4]
- 37 Kiminami K, Fujii K. The relationship between major element concentration and grain size within sandstones from four turbidite sequences in Japan[J]. Sedimentary Geology, 2007, 195: 203-215
- 38 徐方建, 万世明, 李安春, 等. 中国边缘海陆源沉积物粒度与矿物组成的关系[J]. 自然科学进展, 2008, 18(11): 1271-1278 [Xu Fangjian, Wan Shiming, Li Anchun, *et al.* The relationship of mineral components and grain-size of terrigenous materials in the Chinese marginal seas[J]. Progress in Natural Science, 2008, 18(11): 1271-1278]
- 39 徐方建, 李安春, 万世明, 等. 东海内陆架陆源物质矿物组成对粒度和地球化学成分制约[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 2009, 34(4): 613-622 [Xu Fangjian, Li Anchun, Wan Shiming, *et al.* Terrigenous mineral constraints on the grain-size distribution and geochemical composition of sediments in the inner shelf of

- the East China Sea[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2009, 34(4): 613-622]
- 40 徐方建, 李安春, 李铁刚, 等. 末次冰消期以来东海内陆架沉积物地球化学特征及其古环境意义[J]. *地球化学*, 2009, 39(3): 240-250 [Xu Fangjian, Li Anchun, Li Tiegang, *et al.* Geochemical characteristics of sediment on the inner shelf of the East China Sea: implications for paleo-environment since the last deglaciation [J]. *Geochimica*, 2009, 39(3): 240-250]
- 41 Wang Y, Cheng H, Edwards R L, *et al.* The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate [J]. *Science*, 2005, 308: 854-857
- 42 邵晓华, 汪永进, 程海, 等. 全新世季风气候演化与干旱事件的湖北神农架石笋记录[J]. *科学通报*, 2006, 51(1): 80-86 [Shao Xiaohua, Wang Yongjin, Cheng Hai, *et al.* Long-term trend and abrupt events of the Holocene Asian monsoon inferred from a stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record from Shennongjia in Central China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(2): 221-228]
- 43 Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, *et al.* Holocene forcing of the Indian monsoon recorded in a stalagmite from southern Oman [J]. *Science*, 2003, 300: 1737-1740
- 44 王绍武, 黄建斌, 闻新宇, 等. 4~2 ka BP 中国干旱的证据和模拟研究[J]. *科学通报*, 2007, 52(20): 2428-2433 [Wang Shaowu, Huang Jianbin, Wen Xinyu, *et al.* Evidence and modeling study of droughts in China during 4-2 ka BP [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(14): 2215-2221]
- 45 Berger A, Loutre M F. Insolation values for the climate of the last 10 million years [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1991, 10: 297-317

Geochemical Records and Geological Significance of the Continental Shelf Sediments in the Northern South China Sea Since 4400 a

XU Fang-jian¹ CHEN Shi-yue¹ CAO Ying-chang¹ CHEN Mu-hong²
LI An-chun³ XIAO Shang-bin²

(1. Faculty of Geo-Resources and Information, China University of Petroleum, Qingdao Shandong 266555;

2. Key Laboratory of Marginal Sea Geology South China Sea Institute of Oceanology, CAS, Guangzhou 510301;

3. Key Laboratory of Marine Geology and Environment, Institute of Oceanology, CAS, Qingdao Shandong 266071)

Abstract Lithology, AMS¹⁴C dating, grain-size, major and trace element analysis were carried out for Core S20, which was retrieved from the continental shelf in the northern South China Sea (SCS). Sediment provenance and evolution history of Asian monsoon were discussed in this paper. Since 4400 a BP, the lithology of Core S20 is homogeneous, the hydrodynamic conditions in the study area is relatively stable. The silicate material in the source area experienced significant weathering processes. A-CN-K plot and low CIA (chemical index of alteration) value indicated a lower degree of chemical weathering. The river in the eastern Hainan Island and Pearl River is the two most likely sources of the study area. Because of inadequate research on the former, this study could not quantitatively estimate their possible contributions. The variations of CIA, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Na}_2\text{O}$, $\text{CaO}^*/\text{TiO}_2$ and $\text{Na}_2\text{O}/\text{TiO}_2$ value mainly reflect the degree of weathering of the source area. Gradually weakened weathering between 4400 ~ 1600 a BP and strengthened from 1600 a BP to nowadays well corresponded to the absolute-dated oxygen isotope record from Dongge stalagmite, southern China, indicating that the core sediments in the study area containing a wealth of information on the evolution of Asian monsoon. The degree of chemical weathering of sediments in the northern SCS is mainly controlled by the variation of orbitally-induced Northern Hemisphere summer insolation. More research work with high resolution is necessary for extracting information on sediment provenance and monsoon evolution in the Northern SCS shelf.

Key words continental shelf; South China Sea; sediment provenance; Asian monsoon