南海西南陆坡区沉积物粒级指标的物源特征及古环境意义

陈木宏 郑范 陆钧 肖尚斌 颜文 陈忠
向荣 韦刚健 张兰兰

(中国科学院南海海洋研究所, 广州 510301; 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640. E-mail: mhchen@scsio.ac.cn)

摘要 采用激光粒度仪分析了 NS93-5 柱中的沉积物高精度粒度特征, 结合微体古生物类群的实验统计结果以及微量元素和碳酸钙含量等测试资料, 讨论深海沉积物的主要粒级指标及其与微体古生物化石壳体组成和陆源输入的关系, 为揭示深海沉积物的基本组成特征及其指示的古海洋环境做了新的探索. 结果显示: 深海沉积物的粒度特征一定程度反映了物源属性与组成结构, 各个粒级指标的大小范围含量与对应的微体古生物类群丰度和陆缘指标之间存在着明显的相关关系, 其中 $<2\ \mu\text{m}$ 粒级代表陆源物质和 $>5\ \mu\text{m}$ 粒级主要由各类微体古生物壳体所构成(火山灰夹层除外), 中值粒径(MD)可作为微体生物的古生产力或古生态动力特征的参考替代性指标. 这些粒级指标的综合分析结果较好地反映了古海洋生态的重要特征, 表明晚更新世以来南海西南陆坡区的微体生物发育与陆源输入呈负相关关系, 且与冰期和间冰期的全球气候变化不完全对应, 而是表现了该海区的特殊性.

关键词 粒度特征 物源组成 微体古生物 古生态环境 南海

传统的粒度分析主要用于区别沉积物的粒级属性及其定名^[1,2], 以及用于分析搬运介质(包括水流和风力)的动力特征^[3~5]. 近些年来一些学者采用不同手段探讨了沉积物粒度的不同来源多组分分离方法^[6~8], 以期为研究古环境寻找新途径, 取得了明显进展, 甚至利用粒度分析对研究陆地的季风演化记录等起到了重要作用^[9~11]. 至今人们对深海沉积物的研究仅主要探讨了黏土、粉砂和砂等的组成特征^[12], 并重点分析黏土矿物的成分特征和物源分布及其与古季风活动的关系^[12,13], 还利用海底柱状沉积物的粒度数据探讨了陆源物质与沉积动力环境的时空变异^[8]. 这些研究方法侧重的是沉积物的陆源组分和物理特征, 而应用于海洋沉积物时尚未与颗粒的海洋生源成分和生物活动关联, 显然难以达到对海洋尤其是深海沉积物基本组成特征讨论的目的. 深海沉积物的较粗颗粒通常主要来自海洋微体生物壳体. 因此, 有必要针对深海沉积物的特殊组成, 利用近年来普遍使用的激光粒度仪精细的分析手段对深海沉积物的粒度特征与成分关联及其应用做出新的探索. 本文利用取自南海西南陆坡深海区的沉积柱状样品, 根据海洋微体古生物不同类型的壳体大小范围、生物与非生物颗粒的组成特征、相关地球化学元素含量和激光粒度分析仪的高分辨率定量测试结果, 讨论晚第四纪以来深海沉积物的主要粒度组成特征与物源属性,

分析它们作为古生态环境和微体生物古生产力替代性指标的可能性.

1 材料与方法

分析柱状样 NS93-5 位于 $112^{\circ}45.19'E$, $9^{\circ}59.94'N$ 的南海西南陆坡上, 水深 1782 m(图 1), 该处海底地形相对较为平缓, 现代海洋生态环境较为稳定, 受河流搬运沉积影响较小. 柱状样长度 533 cm, 记录了氧同位素 1~6 期特征, 为近 200 ka 以来的沉积产物^[15](图 2). 柱样在氧同位素各期中的平均沉积速率分别为 MIS1: 2.27 cm/ka, MIS2: 2.15 cm/ka, MIS3: 3.03 cm/ka, MIS4: 6.45 cm/ka 和 MIS5: 2.49 cm/ka. 粒度分析的样品采用每 1 cm 的间隔取样, 全柱共取 530 个适量样品, 用纯水加六偏磷酸钠浸泡 24 h 左右, 在中国科学院地质与地球物理研究所的 SALD-2000 型激光衍射粒度仪上进行全样分析, 该仪器测量范围为 $0.03\sim1000\ \mu\text{m}$. 采用沉积物涂片法在显微镜下观察样品原貌与颗粒成分组成特征. 根据微体古生物不同类型的实验室处理方法, 分别定量分析统计了有孔虫、放射虫和硅藻等的丰度组成等, 同时还对经过网径 $63\ \mu\text{m}$ 筛洗后的有孔虫粗组分称重, 并换算它们在沉积物中的重量比^[14]. 各类分析结果除了采用曲

图 1 南海夏季特征海表温度(单位: °C)(1999 年 8 月资料, 据文献[14])与柱样位置

线图示和对比之外, 还分别计算了它们之间在同一变化序列中的相关系数, 以供定量分析相似程度参考.

2 结果与讨论

2.1 粒级指标的基本特征

由于深海环境远离河口或海陆过渡带, 沉积物颗粒除了来自悬浮于海水中的极细粒黏土和少量粉尘物外(火山灰夹层为特例), 其他基本属生物活动的产物. 深海沉积物中往往保留的生物遗体主要是浮游性微体古生物的浮游有孔虫、放射虫、颗石藻、硅藻、翼足类、硅鞭毛虫和少量或个别底栖有孔虫和底栖动物等的壳体. 由于分别具有钙质和硅质的壳体或骨骼, 使它们在死亡后可沉降到海底保存在沉积物中, 成为深海沉积物的主要颗粒来源, 同时也记录了历史时期的古海洋生态环境特征. 其中翼足类和底栖动物(软体动物和苔藓虫等)主要沉积保存于陆架与上陆坡区, 水深一般不超过 1000 m, 而硅鞭毛

图 2 NS93-5 柱氧同位素地层与沉积分层

虫在海洋沉积物中含量极为稀少^[16,17], 因此这些类群在较深海区(超过 1000 m水深)的沉积物粒度组成中可以忽略. 深海沉积物中的这些粒度组成重要特征尚未得到详细揭示和分析应用.

根据各种实验方法的综合分析结果, 深海沉积物按粒级范围大概可划分为几个主要类型: (1) 非生物组成: 小于 5 μm 粒级的主要属非生物颗粒物, 其中小于 2 μm 粒级为黏土, 2~5 μm 范围属极细粉砂陆源物; (2) 生物组成: 大于 5 μm 粒级的一般为微体古生物壳体组成(在个别火山灰层中则含火山玻璃碎屑除外), 其中 5~20 μm 粒级以钙质超微化石(颗石藻)为主, 20~60 μm 范围主要是硅藻壳体, 同时包含一些有孔虫和放射虫的幼体颗粒, 大于 60 μm 的则基本由有孔虫和放射虫壳体组成. 这些海洋性微体生物分别具有方解石质和蛋白石质的壳体或骨骼, 死亡后可沉积保存于碳酸盐溶解补偿深度以上的海底沉积物中; (3) 火山碎屑: 颗粒大小不等, 主要在 30 μm 粒级以上, 为火山玻璃物, 呈夹层状分布于地层中.

图 3 为位于南海西南陆坡 NS93-5 柱近 200 ka

来一些主要粒级含量指标的变化特征, 它们分别代表不同的微体生物指标意义, 在古海洋环境中指示一定的生态发育特征, 具有较高分辨率的定量分析与对比作用. 图 3 中曲线 b 为 <2 μm 粒级, 代表黏土含量或陆源输入物的变化; 曲线 c 为 >5 μm 粒级, 代表微体生物总合的含量变化, 曲线 d 为 >65 μm , 代表有孔虫和放射虫的混和组成; 曲线 e 是中值粒径(M_d)的含量变化, 指示生态沉积动力特征或微体生物生产力状况. 这些粒级指标在晚更新世以来的变化特征反映了海区生态环境中微体生物发育与陆源黏土输入的负相关关系(相关系数-0.929), 其中在氧同位素第 4 期陆源输入物较多, 造成海洋生态环境较差, 而在氧同位素 1 期(全新世)的中期海洋生态环境达到一个较佳状况, 是微体生产力发展的高峰期, 但随后又环境逐渐变差和生物量减少.

2.2 粒级指标与微体古生物相关类群关系

为了检验粒度分析的粒级指标对不同类型微体古生物群遗壳含量的指示作用, 图 4 主要显示了

图 3 NS93-5 柱中主要粒度指标变化特征

<https://engine.scichina.com/doi/10.1360/csb2005-50-7-684>

图 4 硅藻和放射虫丰度与相关粒级和陆源指标比较

30~65 μm 粒级含量与硅藻和放射虫丰度的变化关系。由于实测的硅藻和部分放射虫壳体的粒径在 30~65 μm 之间, 它们的变化曲线相互对应较好, 表明微体古生物分析方法所得的丰度变化与粒度分析的结果大致吻合。虽然该粒级范围也包含部分的浮游有孔虫幼小个体, 难以完全区分粒级的简单物质属性, 但是由于浮游有孔虫幼体的丰度含量相对较小以及浮游有孔虫丰度变化曲线的与之差异性, 我们基本上可以判断 30~65 μm 粒级主要代表的是硅藻, 以及部分的放射虫和有孔虫幼体。尽管激光粒度仪分析和微体古生物分析两种不同方法与过程造成分析结果存在一定差异性, 尤其是微体古生物分析中由于经历多次水洗过程使最后在统计丰度时产生误差的偶然性难以避免, 如硅藻曲线中的个别突变高丰度值可能属异常点, 但从阶段性变化特征上仍与 30~65

μm 曲线有较好对应关系。30~65 μm 曲线与硅藻+放射虫曲线(图 4 中的 a 与 d)的数值相关系数为 0.471, 表明其相关性不是太好。然而, 若去除异常点后这 2 条曲线的阶段性变化趋势则显示出较为相似的特征。总体上, 深海沉积物粒度分析的结果可相对定量地作为相关生物类群丰度的参考指标, 有关钙质超微化石和有孔虫对应的粒级指标还可结合化学分析的沉积物碳酸钙含量等资料给予验证。

深海沉积物中的碳酸钙主要由有孔虫和钙质超微化石壳体组成, 这两类生物有着明显不同的壳径范围, 分别对应不同的粒级。因此碳酸钙含量是它们的总合, 仅作为各自的参考。它们在 NS93-5 柱中的含量变化曲线排列于图 5 中, 同时还显示了浮游有孔虫的丰度及其粗组份单位重量的变化曲线。其中粗组分含量与 >30 μm 粒级含量的曲线对应最好(两者相

图5 碳酸钙含量、有孔虫丰度及粗组分含量与粒级指标关系

关系数 0.745), 变化特征基本相似, 与 CaCO_3 含量变化也存在较好的可比性(相关系数 0.701), 说明粒度分析的深海沉积物 $>30\ \mu\text{m}$ 粒级含量变化同时也可以代表有孔虫的相对丰度变化. 钙质超微化石的壳径范围在 $1\sim35\ \mu\text{m}$ 之间, 多数为 $5\sim30\ \mu\text{m}$. 粒度分析的 $5\sim30\ \mu\text{m}$ 粒级含量变化曲线也与 CaCO_3 含量曲线有一定的相似性(图 5), 它们之间的相关系数为 0.769, 总体变化趋势接近, 表明两者之间存在较好关联. 但由于钙质超微化石个体微小和结构上的特殊性(片状中空), 使其在 CaCO_3 含量中所占份额相对较小, 造成 $5\sim30\ \mu\text{m}$ 粒级(钙质超微化石)含量与 CaCO_3 含量的关联程度明显不如 $>30\ \mu\text{m}$ (有孔虫)含量(后者相关系数 0.809), 指示深海沉积物中 CaCO_3 含量变化主要受有孔虫丰度的影响和控制.

2.3 粒级指标与古环境变化

显然, 深海沉积物的 $<2\ \mu\text{m}$ 粒级包含了黏土矿物

和较细的非生物颗粒部分, 其物质成分主要来源于陆表风化后的搬运输入, 对此作进一步验证将有助于认识深海沉积物粒级指标的涵义与作用. 根据 Ti 元素的地球化学行为等特征, 人们已将其在海洋沉积物的含量变化作为陆源物输入多少的一个重要指标^[18~20], 并应用于古海洋环境分析中^[21]. 对比 Ti 元素含量和 $<2\ \mu\text{m}$ 粒级含量在 NS93-5 柱中的变化情况, 发现两者之间存在着一定的对应关系(图 4, 相关系数为 0.494). 自氧同位素第 6 期以来, 当 Ti 元素含量较低时 $<2\ \mu\text{m}$ 粒级含量较低, 当 Ti 元素含量较高时 $<2\ \mu\text{m}$ 含量也较高, 两者几乎同时发生相应变化, 表明在南海南部深海沉积物中利用粒度分析的 $<2\ \mu\text{m}$ 粒级作为陆源输入物替代性指标是可靠的.

综合上述参数的变化特征, 为揭示南海南部近 200 ka 的古海洋环境演变历史提供了分析依据, 可以相互映证. 图 4 和图 5 显示了 NS93-5 柱状沉积物中

的陆源指标($<2\ \mu\text{m}$ 粒级含量和 Ti 元素含量)与微体古生物的硅藻、放射虫和有孔虫壳体丰度的变化曲线。可以看出,当陆源输入物较少时,微体生物发育程度较高,海洋生态环境较好,反之则随着逆向变化。大量的现代生态调查证据已证实了这一现象,如海洋性的浮游微体生物一般在河口近岸水域发育较差,而在远洋海域发育较好。在 MIS2~5 期,陆源物含量较高,反映陆表的风化、搬运及其对海洋的输入程度较高^[21],该时期由于大量非海洋因素的陆源输入影响了正常的海洋生态环境,一定程度导致了海洋微体生物的生产力较低(图 3~5);而在 MIS 1 期则与之相反,该时期陆源指标明显降低,微体生物的粒度指标和丰度指标均显著增高,表明正常的海洋生态环境具有一定的约束因素,在受其他因素干扰较少的情况下各类生物才能正常发育。尽管陆源物给海洋带来大量的营养元素,但是淡水及其他有害物在海水中的散布也会不同程度地破坏正常的海洋生态环境。另一方面,河流输入的陆源物质分布也受海平面变化影响^[22,23],陆源物多为低海面河口外伸沉积所致,反之则为高海面远离河口的结果(中全新世为例)。根据氧同位素各期的沉积速率计算结果(未知柱样底部具体年龄,故无法推算 MIS6 期的沉积速率),在 MIS4 期的沉积速率相对较大,表明其对微体生物的埋藏产生一定的稀释作用,该时期微体生物生产力较低应受稀释作用影响。除此之外,包括 MIS2 期在内的其他冰期与间冰期的沉积速率差别较小,说明上述各项微体生物指标在末次盛冰期时受陆源物稀释作用的影响不明显。

从图 4 可见,既然陆源输入与 NS93-5 柱所在区域的微体生物发育不是正相关关系,推测海区的微体生物发育主要受上升流影响,该区上升流活动由夏季风所控制^[14],在 MIS 1 和 6 期的相关研究结果可以说明这一情况^[15,24],本文的分析结果也进一步给予证实(图 3~5),但与前期的一些采用不同方法得出的生物生产力在冰期高于间冰期的结论^[25,26]存在差异。根据本项工作的分析结果,我们认为该海区总体上微体生物丰度及其相应粒度指标指示了夏季风强度的变化,其中以放射虫和硅藻丰度指标为典型代表(图 3),而以 $5\sim 30\ \mu\text{m}$ 粒级替代的超微化石(颗石藻)指标似乎也显示了这一特征(图 5)。在倒数第 2 次冰期(MIS 6 期)中各类微体生物的生产力相对稍高,此后的末次间冰期和冰期(MIS 5-2 期)中微体生物生产力

水平普遍较低,盛冰期微体生物生产力开始迅速回升,至全新世中期达到近 200 ka 来的最高状态。NS93-5 柱中各类微体生物或相关粒度指标与 $\delta^{18}\text{O}$ 值变化的相关系数仅在 0.059 至 -0.332 之间,表明晚更新世以来南海南部微体生物生产力的发育与全球气候的冰期和间冰期关联并不明显,而是表现了东亚季风系统环境在热带海区的特殊性。

3 结论

() 尽管各个粒级指标范围与对应的微体古生物类群丰度之间尚未建立等量的转换或替代关系,但它们的相对含量存在着明显的相互关联,采用 $>5\ \mu\text{m}$ 粒级或中值粒径作为微体生物古生产力及古生态动力状况的参考替代性指标具有分析的客观性和应用的便利性。利用激光粒度分析仪的高精度和高分辨率测试,将是尝试探讨深海沉积物中古环境记录的一种有效新手段和新方法。

() 南海南部 NS93-5 柱的分析结果表明,深海沉积物的粒度指标可一定程度反映物源属性与构成,作为相关的微体古生物类型或陆源替代性指标可应用于高分辨率探讨古海洋环境及全球变化中陆地作用对海洋生态环境的某些影响效应。

() 晚更新世以来南海南部海区的微体生物发育受陆源输入物影响,两者相互之间呈负相关关系,且与冰期和间冰期的全球气候似乎不存在完全对等的关系,而可能是受南海夏季风控制。夏季风驱动的上升流活动决定了微体生物发育的盛衰。

() 受沉积环境影响,本文所讨论分析方法适合于一一般取自陆坡区的样品,而对陆架区和碳酸盐溶跃面以深海区的样品由于其沉积环境和沉积结构的特殊性需另作讨论。

致谢 本工作受中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX3-SW-220)、国家自然科学基金项目(批准号:40476024)、国家重大基础研究发展规划项目(2000078500)和科学技术部社会公益研究专项(2003DEA6N041)的资助。

参 考 文 献

- 1 刘昭蜀,赵焕庭,范时清,等. 南海地质. 北京: 科学出版社, 2002. 1~502
- 2 罗又郎,劳焕年,王淦漪. 南海东北部表层沉积物类型与粒度特征的初步研究. 热带海洋, 1985, 4(1): 33~41
- 3 Chen F H, Bloemendal J, Wang J M, et al. High-resolution multi-proxy climate records from Chinese loess: evidence for

- rapid climatic changes over the last 75 kyr. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 1997, 130: 323~335[DOI]
- 4 Baosheng L, Zhang D D, Heling J, et al. Paleo-monsoon activities of Mu Us Desert, China since 150 ka B.P. — a study of the stratigraphic sequences of the Milangouwan Section, Salawusu River area. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2000, 162: 1~16[DOI]
- 5 Wang H, Liu H, Cui H, et al. Terminal Pleistocene/Holocene palaeoenvironmental changes revealed by mineral-magnetism measurements of lake sediments for Dali Nor area, southeastern Inner Mongolia Plateau, China. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2001, 170: 115~132[DOI]
- 6 Prins M A, Postma G, Weltje G. Controls on the terrigenous sediment supply to the Arabian Sea during the late Quaternary: the Makran continental slope. *Marine Geology*, 2000, 169: 351~371[DOI]
- 7 Sun D H, Bloemendal J, Rea D K, et al. Grain-size distribution function of polymodal sediments in hydraulic and aeolian environments, and numerical partitioning of the sedimentary components. *Sedimentary Geology*, 2002, 152: 263[DOI]
- 8 孙有斌, 高抒, 李军. 边缘海陆源物质中环境敏感粒度组分的初步分析. *科学通报*, 2003, 48(1): 83~86[摘要] [PDF]
- 9 Vandenbergh J, An Z S, Nugteren G, et al. New absolute time scale for the Quaternary climate in the Chinese loess region by grain-size analysis. *Geology*, 1997, 25: 35~38[DOI]
- 10 Ding Z L, Yu Z W, Yang S L, et al. Coeval changes in grain size and sedimentation rate of eolian loess, the Chinese Loess Plateau. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 2097~2100[DOI]
- 11 Ding Z L, Derbyshire E, Yang S L, et al. Stacked 2.6-Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea $\delta^{18}\text{O}$ record. *Paleoceanography*, 2002, 17(3-5): 1~20
- 12 Thamban M, Rao V P, Schneider R R. Reconstruction of late Quaternary monsoon oscillations based on clay mineral proxies using sediment cores from the western margin of India. *Marine Geology*, 2002, 186: 527~539[DOI]
- 13 Liu Z, Trentesaux A, Clemens S C, et al. Clay mineral assemblages in the northern South China Sea: implications for East Asian monsoon evolution over the past 2 million years. *Marine Geology*, 2003, 201: 133~146[DOI]
- 14 Xie S P, Xie Q, Wang D, et al. Summer upwelling in the South China Sea and its role in regional climate variations. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108 (8): 1~13
- 15 陈木宏, 涂霞, 郑范, 等. 南海南部近 20 万年沉积序列与古气候变化关系. *科学通报*, 2000, 45(5): 542~548 [PDF]
- 16 陈木宏, 陈绍谋. 南海碳酸盐溶解与深海沉积类型. *热带海洋*, 1989, 8(3): 20~26
- 17 陈木宏, 蔡慧梅, 涂霞, 等. 南沙群岛及邻近海区晚第四纪的微生物与环境. 北京: 海洋出版社, 1996. 1~210
- 18 Goldberg E D, Arrhenius G O S. Chemistry of Pacific pelagic sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1958, 13: 152~212
- 19 Murray R W, Leinen M. Chemical transport to the seafloor of the equatorial Pacific across a latitudinal transect at 135W: Tracking sedimentary major, trace and rare earth fluxes at the equator and the ITCZ. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1993, 57: 4141~4163[DOI]
- 20 Murray R W, Knowlton C, Leinen M, et al. Export production and terrigenous matter in the central equatorial Pacific Ocean during interglacial oxygen isotope stage 11. *Global Planet Change*, 2000, 24: 59~78[DOI]
- 21 Wei G, Liu Y, Li X, et al. High-resolution elemental records from the South China Sea and their paleoproductivity implications. *Paleoceanography*, 2003, 18 (2): 1~12
- 22 Wang P. Response of West Pacific marginal seas to glacial cycles: paleoceanographic and sedimentological features. *Marine Geology*, 1999, 156: 5~39[DOI]
- 23 Wang L, Sarinthein 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[DOI]
- 24 Jian Z, Huang B, Kuhnt W, et al. Late Quaternary upwelling intensity and East Asian monsoon forcing in the South China Sea. *Quaternary Research*, 2001, 55: 363~370[DOI]
- 25 Thunell R C, Miao Q M, 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 Huang C Y, Wu S F, Zhao M X, et al. Surface ocean and monsoon climate variability in the South China Sea since the last glaciation. *Marine Micropaleontology*, 1997, 32: 71~94[DOI]

(2004-09-02 收稿, 2005-01-13 收修改稿)