

孟加拉湾东经 90°海岭中上新世以来沉积记录及亚洲季风

张振芳¹, 方念乔², 吴琳², 王建乔², 刘荣梅¹

1. 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083

摘要: 利用古生物地层学、碳酸盐地层学、X 射线粉晶衍射和粒度分析等方法对东北印度洋孟加拉湾东经 90°海岭上的远洋沉积物进行了综合研究。在此基础上, 以陆源物质的粒度为切入点对该区的沉积作用、沉积物来源及其可能的搬运机制进行了探讨, 对过去有关研究区陆源物质的源区和搬运方式作了补充。陆源物质的粒度可作为东南季风或赤道东风的替代性指标, 其变化不仅反映源区的火山活动情况, 而且指示了风力的强弱。陆源物质的多少则主要取决于青藏高原和印度次大陆的剥蚀情况和地表径流的强弱。二者之间通过高原隆升及其引发的环境效应联系起来。

关键词: 东经 90°海岭; 陆源物质粒度; 碳酸盐地层; 亚洲季风; 中上新世。

中图分类号: P534.63; P532

文章编号: 1000-2383(2004)02-0157-06

收稿日期: 2003-08-04

Sedimentary Records and Asian Monsoon in Ninetyeast Ridge of Bay of Bengal since Pliocene Time

ZHANG Zhen-fang¹, FANG Nian-qiao², WU Lin², WANG Jian-qiao², LIU Rong-mei¹

1. *Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China*

2. *Faculty of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

Abstract: The pelagic sediments of Ninetyeast ridge have been synthetically analyzed through paleobiostratigraphy, carbonate stratigraphy, X-ray crystal powder diffraction and grain size analysis. The grain size of terrigenous sediments has been regarded as a cut-in in the discussion of sedimentation, sources and possible carrying mechanisms of the sediments. The source and carrying pattern of the terrigenous sediments have been supplemented further. The grain size of the terrigenous sediments can serve as an indicator of southeast monsoon or equatorial east wind. Its change not only reflects the volcanic activity of the source region of the terrigenous sediments but also indicates the wind strength. However, the quantity of the terrigenous sediments mainly depends on the erosion of the Tibetan plateau and Indian subcontinent and the runoff. The two aspects have been associated by the uplift of the plateau and its environmental effects.

Key words: Ninetyeast ridge; grain size of terrigenous sediment; carbonate stratigraphy; Asian monsoon; Pliocene time.

新生代以来, 两极冰盖的形成和一系列构造运动对全球环境有显著影响。冰盖的形成导致全球性海气系统重新组合(Flower and Kennett, 1993); 构造运动则通过引起地形地势及海陆分布的变化导致气候环境变迁。如喜马拉雅和青藏高原的隆升可能是晚新生代全球变冷的重要因素(Ruddiman *et al.*,

1989); 海峡关闭则对洋流及热量传输产生重要作用, 并最终导致海气系统重组(Burton *et al.*, 1997; Raymo *et al.*, 1990; Cane and Molnar, 2001)。

在 40 Ma 左右, 印度板块与亚洲板块间的特提斯洋最终封闭, 青藏地区南部的冈底斯带受到印度板块的俯冲下插和挤压而强烈隆起。自此, 青藏地区

开始了漫长的隆升和风化剥蚀过程(施雅风等, 1998). 其风化剥蚀的产物由地表径流带入东北印度洋孟加拉湾, 形成世界上最大的深海浊积扇, 即孟加拉扇. 孟加拉扇的沉积记录对高原隆升及其引发的环境变化起监视器的作用, 同时其较高的沉积速率(一般为 $(5\sim 8)\times 10^{-3}$ cm/a)也为研究叠加于长期构造演化上的高精度气候变化提供了良好的信息载体(Peirce and Weissel, 1989). 但由于扇体结构和沉积过程的复杂性, 记录中的一些问题尚待重新审视, 而高原隆升引起邻区海洋和大气环境系统的变化在东北印度洋区的远洋沉积记录中应有更直接的体现(方念乔等, 2001). 因此, 90°E 海岭的远洋沉积将是验证高原隆升及其引发的环境效应的理想场所(Peirce and Weissel, 1989; 方念乔等, 2001; Klootwijk *et al.*, 1992). 本文通过对孟加拉湾 90°E 海岭上 3 根岩心的古海洋学研究, 对沉积记录中的古环境信号进行讨论.

1 材料和方法

本文用于研究的岩心分别是由执行深海钻探计划(DSDP)的美国 Glomar Challenger 号科考船在 1972 年第 22 航次和大洋钻探计划(ODP)的 Joides Resolution 号科考船在 1989 年第 121 航次钻取的. 目前, 钻心保存于美国德克萨斯农工大学样本库. 其中 DSDP216 和 DSDP217 2 根岩心的回收率很低, 尤其是顶部岩心极不连续, 研究程度很低. 而 ODP758 岩心上新世以来的回收率可达 100%, 年代格架也已建立, 因此将是本次研究的重点. 3 根岩心的位置及基本沉积特征如表 1. 本文对申请的 195 件样品作了 CaCO_3 含量测定、陆源物质粒度分析、有孔虫生物地层分析及对部分样品的全岩 X 粉晶衍射.

2 研究区沉积特征

研究区位于孟加拉湾中部低纬地区的东经 90° 海岭最北端(图 1), 水深约为 2 200~3 000 m, 自北向南高出孟加拉扇分别约 500, 1 000, 2 000 m. 此处的表层水温(SST)较恒定, 常年为 $(28.5\pm 1.0)^{\circ}\text{C}$, 盐度为 $(33.8\pm 0.3)\times 10^{-3}$, 指示该区属于典型的热带开阔大洋环境. 因此沉积作用以远洋沉积为主, 即以浮游型钙质生物壳体在水柱中的垂直降落为主要

表 1 岩心概况

Table 1 Overview of studied bore cores

岩心编号	经度	纬度	水深/m	心长/m
DSDP217A	$90^{\circ}32'\text{E}$	$8^{\circ}56'\text{N}$	3 030	345.5
ODP758A	$90^{\circ}22'\text{E}$	$5^{\circ}23'\text{N}$	2 925	676.8
DSDP216A	$90^{\circ}12'\text{E}$	$1^{\circ}28'\text{N}$	2 237	353.0

DSDP217A 为浅灰色含粘土钙质软泥; ODP758A 为灰白色富粘土钙质软泥; DSDP216A 为灰白色钙质软泥.

特征. 沉积记录以有孔虫超微化石软泥为主, CaCO_3 含量高达 60%~80%, 硅质生物含量很小甚至没有, 陆源物质的稀释作用远不如孟加拉扇区(Peirce and Weissel, 1989; 方念乔等, 2001), 沉积速率不超过 2 cm/ka. 非生物沉积主要有陆源的粉砂、粘土以及火山玻璃等. 其中陆源粘土含量达 10%~30%, 火山玻璃的含量相对较少, 偶有火山灰夹层.

通过对 3 根岩心的 195 件样品分析发现: 从横向上来看, 从南向北 CaCO_3 含量减少、粘土含量增加, 变化幅度约为 10%~20%(表 2). 出现这种结果的原因有 2 个: 一是由于从南向北与陆源物质源区——喜马拉雅山和印度次大陆的距离逐渐缩小, 因而陆源物质的稀释量增加, CaCO_3 含量减少. 另一方面的原因是从南向北海岭的海底地形逐渐降低, 因此水深加大, 而有孔虫的溶解与水深密切相关, 当水深达到一定程度时, 有孔虫会随深度增加而快速溶解, 在此之上则可很好地保存下来, 这样一个临界深度称为有孔虫溶跃层(Berger, 1975). 因此, 粗颗粒有孔虫含量可很好地反映 CaCO_3 的溶解情况(Berger, 1990; Berger *et al.*, 1982). 在孟加拉湾有孔虫溶跃层最北端约为 2 200 m, 南端约为 2 750 m, 即 DSDP217 和 ODP758 两个站位位于溶跃层之下, 有孔虫溶解加强, DSDP216 位于溶跃层之上, 有孔虫溶解相对较弱. 但是由于 3 根岩心在研究时段内的沉积速率相近, 由此推断 CaCO_3 含量横向上的这种变化主要由陆源物质的稀释作用引起. 从纵向上来看, CaCO_3 含量从老到新也在减少, 减小的幅度约为 10%. 造成这种纵向上减小的原因可能有 3 个, 即钙质生物生产力、 CaCO_3 溶解和非 CaCO_3 的稀释. 据有孔虫生物地层分析结果中上新世以来生物的生产力增加, 而且 $>125\ \mu\text{m}$ 有孔虫百分含量也增加, 说明 CaCO_3 的溶解减弱, 由此推断 CaCO_3 含量纵向上的变化也是由非 CaCO_3 成分的稀释作用引起的. 这一点也可从 ODP758 钙质超微化石的保存情况得到印证. 从中中新世以来, 来自孟加拉扇的陆源粘

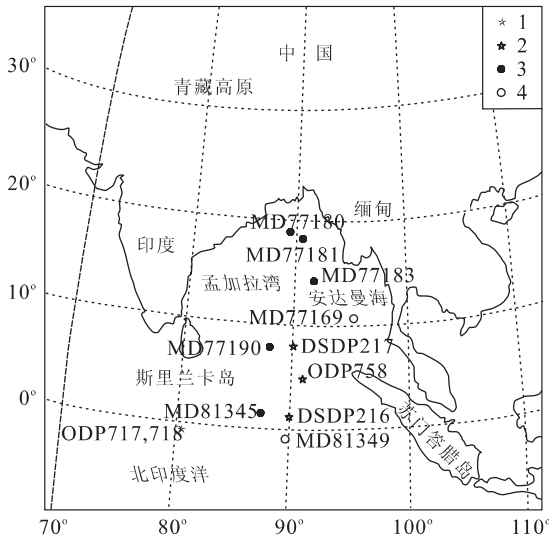


图 1 研究区地理位置和采样点

Fig. 1 Location of studied area and sampling sites

1. 孟加拉扇的 ODP 和 DSDP 钻心;
2. 90°E 海岭的 ODP 和 DSDP 钻心;
3. 孟加拉扇的活塞柱状样;
4. 90°E 海岭和安达曼海山的活塞柱状样

表 2 3 根岩心的沉积物组成变化

Table 2 Sedimentary constitution of the studied bore cores

岩心编号	碳酸钙含量/%	粘土含量/%
DSDP217A	55	30
ODP758A	60	20
DSDP216A	80	10

土稀释了碳酸盐沉积,从而抑制了钙质超微的过度生长,使其易于保存(Peirce and Weissel, 1989). 此次研究首次对陆源物质的粒度进行了分析,发现存在经向上的反粒序变化,这与此前有关这部分物质的来源和搬运机制的认识不符. 此前多认为岭上的非碳酸盐沉积物归因于浊流或等深流活动(Peirce and Weissel, 1989; Klootwijk *et al.*, 1992),但从岭上完整而连续的沉积记录中未发现事件沉积,因此方念乔等(2001)对岭上非碳酸盐物质的混入形式提出质疑. 笔者将对这部分沉积物可能的搬运方式作进一步探讨.

3 海岭上 2 类沉积物的形成机制探讨

研究区的 2 类沉积物的沉积特征前已述及,本次研究的一个新发现是非生物组分粒度从南向北在减小,而且 $>45 \mu\text{m}$ 及 $>63 \mu\text{m}$ 的粗颗粒组分含量也在减少. 这样就无法完全由其北面的源区来解释.

Farrell and Janecek (1991) 对 ODP758 5 Ma 以来的沉积记录研究中发现,研究区沉积物主要为生物成因的远洋 CaCO_3 , 同时还有细粒的陆源粉砂和粘土以及火山碎屑,沉积物中生物蛋白石和有机碳的含量很低,故陆源物质含量可视为 $100\% \text{CaCO}_3$. 而陆源物质主要是由源自喜马拉雅山南北两麓的恒河和普拉马普特河将喜马拉雅山和印度次大陆的沉积物携带至此. 其中粗粒的沉积于孟加拉扇上,细粒的粉砂和粘土则可能由浊流引起的雾状层搬运到高出孟加拉扇约 1 000 m 的东经 90°海岭上(Farrell and Janecek, 1991; Stow *et al.*, 1990). 如果陆源物质仅由这部分组成,则其粒度根据 3 根岩心相对于源区的位置及海底地形从南向北应增加,结果却恰好相反. 出现这种反粒序排列的结果,促使了我们对用于粒度测试的那部分沉积物做进一步研究,发现:该组分既有陆源的石英砂,也有火山玻璃及溶岩碎片,而且火山物质的量从南向北减少. 这与岩石切片观察的结果吻合. 对 3 根岩心的沉积物切片观察发现 DSDP217 的非生物组分主要为伊利石、石英和斜长石,小于 $2 \mu\text{m}$ 的组分中可见火山灰物质; ODP758 主要为蒙脱石和伊利石,可见少量火山玻璃; DSDP216 则主要为蒙脱石,同时有丰富的火山玻璃及绿泥石质的熔岩碎片. 这也与 X 粉晶衍射的结果一致. Kolla *et al.* (1973, 1976)对东北印度洋表层沉积物中的粘土矿物和孟加拉湾现代底流研究中发现的伊利石主要源自喜马拉雅和青藏高原,蒙脱石则与火山成因的岩石有关,据此将东北印度洋分成 4 个区. 在孟加拉扇北端为恒河区,伊利石含量可达 60%,东经 90°海岭将该区分为东西 2 支,海岭则属印尼,蒙脱石含量可达 60%(图 2). 他们认为 DSDP216 的蒙脱石源自印尼群岛. Franz *et al.* (2001)对印尼与西北澳大利亚之间表层沉积物中粘土矿物的分布和搬运机制研究中也得出相同的结论(Gingele *et al.*, 2001). Hovan and Rea (1992)对 ODP758 30 Ma 以来陆源物质的通量研究发现:从约 9.5 Ma 开始 ODP758 陆源物质通量明显增加,之前主要为风成的火山物质,而且含量甚微;之后陆源物质大幅度增加,尤其是 3.9~2 Ma 陆源物质增加的幅度更大,为前两者总和的数倍(Hovan and Rea, 1992)(图 3). 他们认为这种陆源物质的增加是由于青藏高原的隆升引起的. 这一结论与 Peirce and Weissel(1989)的结果相吻合——中晚中新世以前主要的非远洋沉积物是少量的印尼火山灰,之

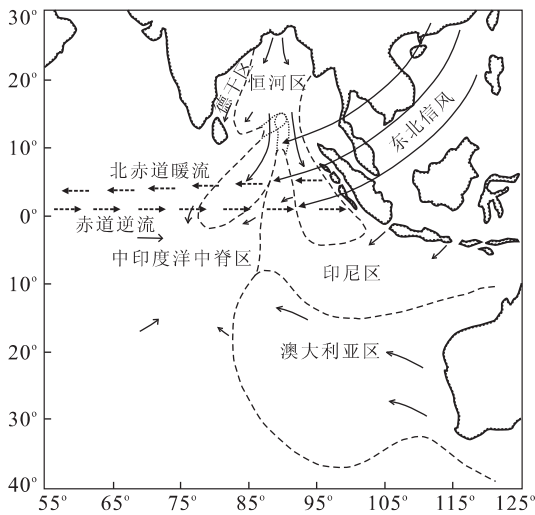


图 2 东印度洋粘土矿物分布(据 Kolla and Pierre, 1973)
Fig. 2 Clay mineral provinces and dispersal paths of sediments in eastern Indian Ocean

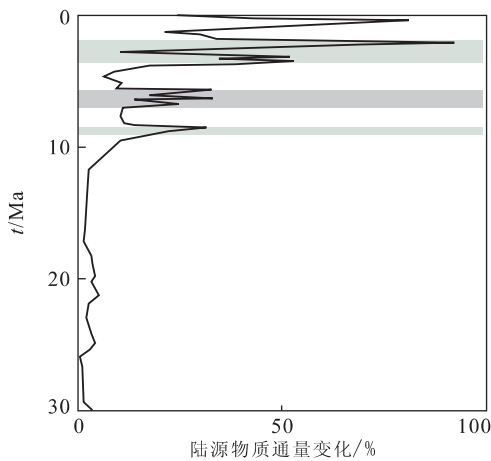


图 3 ODP758 30 Ma 以来陆源物质通量变化
Fig. 3 Variations in terrigenous mineral accumulation rate in samples from ODP758 plotted versus age

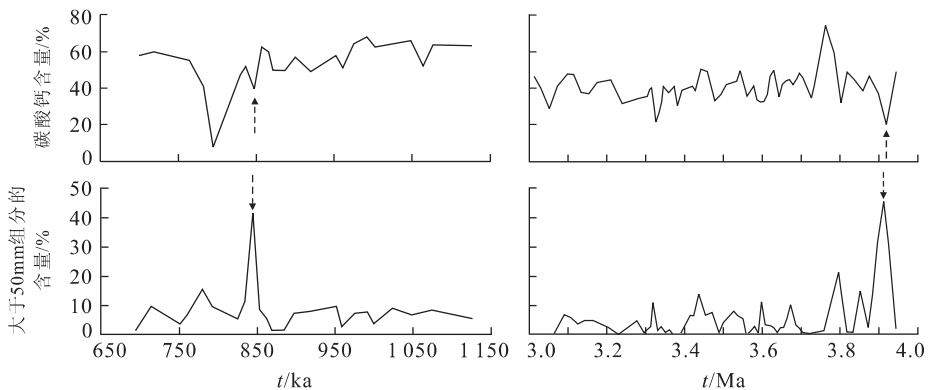


图 4 ODP758 4~3 Ma 及 1.15~0.65 Ma 碳酸钙含量与粗组分含量对比
Fig. 4 Variations in coarse component and CaCO₃ contents in samples from ODP758 plotted versus age

后陆源物质明显增加,认为与高原抬升引起的剥蚀物增加有关.值得一提的是, Hovan and Rea(1992)在计算陆源物质通量的过程中发现:有些样品中的火山灰含量较高,因此他不得扣除掉这部分含量以求尽量准确.这就是说研究区沉积物中除了独立的火山灰层外,还有少量的火山灰物质沉积于整个岩心中.而火山灰不可能由其北面的源区提供,由此推断它可能由东南季风或赤道东风由印尼群岛带来.由此得出结论:研究区的陆源物质有 2 个来源:除主要由油流引起的雾状层带来的青藏高原和印度次大陆的剥蚀物以外,还有由东南季风或赤道东风带来的印尼群岛的火山物质.而且 Dehn *et al.* (1991)对 ODP758 上新世以来的 17 个主要火山灰层的粒度研究发现,火山物质的粒度较大,其中值粒径可达 75 μm,最大粒径为 150 μm,而且所有火山灰层属于同源同机制喷发.因此使距离源区较近的 DSDP216 的陆源物质粒度较大,粗颗粒含量较高.这一点在 ODP758 中也有明显体现.从 ODP758 4~3 Ma 及 1.2~0.7 Ma 的 CaCO₃ 含量和粒度曲线上可以看出(图 4),由于在 4 Ma 及 0.78 Ma 附近 ODP758 沉积了厚达 8 cm 和 5 cm 的火山灰层,因此在其上覆地层中表征粗颗粒含量的粒度曲线出现明显峰值,并与 CaCO₃ 含量曲线的谷值对应,说明火山物质的稀释作用增强.另外,在 0.78 Ma 也有类似的情况,对这些层位的样品的 X 粉晶衍射发现其中含有非晶质.从纵向上来看,陆源物质粒度从老到新逐渐增加.这一点在 DSDP217 明显可见.在 4 Ma 附近最北端的 DSDP217 还没有粗颗粒沉积,而在 3 Ma 附近已有微量粗颗粒沉积.推断由于中上新世 3.6 Ma 附近青藏高原隆升使东南季风加

强,因此携带的火山物质增加。

4 结论

研究区碳酸钙含量的减少主要由陆源物质的稀释作用引起。陆源物质有 2 个来源:青藏高原及印尼群岛,分别由浊流及东南季风或赤道东风带来。陆源物质的粒度变化主要反映源自印尼群岛的火山灰含量变化,因此可作为东南季风或赤道东风的替代性指标。中上新世以来陆源物质粒度增大反映源区的火山活动增强及东南季风或赤道东风加强。

References

- Berger, W. H., 1975. Deep-sea carbonates: Dissolution profiles from foraminiferal preservation. In: Sliter, W. V., Bé, A. W. H., Berger, W. H., eds., Dissolution of deep-sea carbonate. *Spec. Publ. Found. Foraminiferal Res.*, 13: 82—86.
- Berger, W. H., 1990. Planktonic foraminifera: Selective solution and the lysocline. *Mar. Geol.*, 8: 111—138.
- Berger, W. H., Bonneau, M. C., Parker, F. L., 1982. Foraminifera on the deep-sea floor: Lysocline and dissolution rate. *Oceanol. Acta*, 5: 249—258.
- Burton, K. W., Ling, H. F., O'Nions, R. K., 1997. Closure of the Central American Isthmus and its effect on deep-water formation in the North Atlantic. *Nature*, 386: 382—385.
- Cane, M. A., Molnar, P., 2001. Closing of the Indonesian seaway as a precursor to East African aridification around 3—4 million years ago. *Nature*, 411: 157—162.
- Cullen, J. L., Prell, W. L., 1984. Planktonic foraminifera of the northern Indian Ocean: Distribution and preservation in surface sediments. *Mar. Micropaleontol.*, 9: 1—52.
- Dehn, J., Farrel, J. W., Schmincke, H. U., 1991. Neogene tephrochronology from Site 758 on northern Ninetyeast ridge: Indonesian arc volcanism of the past 5 Ma. In: Weissel, J., Peirce, J., eds., *Proc. ODP Sci. Results*, 121: 273—293.
- Fang, N. Q., Chen, X. F., Hu, C. Y., et al., 2001. Deep sea sedimentary records in the northeastern Indian Ocean and their response to the uplift of the Qinghai-Xizang plateau. *Quaternary Sciences*, 21(6): 490—499 (in Chinese with English abstract).
- Farrell, J. W., Janecek, T. R., 1991. Late Neogene paleoceanography and paleoclimatology of the Northeast Indian Ocean (Site 758). In: Weissel, J., Peirce, J., eds., *Proc. ODP Sci. Results*, 121: 297—315.
- Flower, B. P., Kennett, J. P., 1993. Middle Miocene ocean-climate transition: High-resolution oxygen and carbon isotopic records from Deep Sea Drilling Project Site 588 A, Southern Pacific. *Paleoceanography*, 8: 811—843.
- Gingele, F. X., Deckker, P. D., Hillenbrand, C. D., 2001. Clay mineral distribution in surface sediments between Indonesia and NW Australia—source and transport by ocean currents. *Mar. Geol.*, 179: 135—146.
- Hovan, S. A., Rea, D. K., 1992. The Cenozoic record of continental mineral deposition on Broken and Ninetyeast ridges, Indian Ocean: Southern African aridity and sediment delivery from the Himalayas. *Paleoceanography*, 7(6): 833—860.
- Klootwijk, C. T., Gee, J. S., Peirce, J. W., et al., 1992. Neogene evolution of the Himalayan-Tibetan region: Constraints from ODP 758, northern Ninetyeast ridge, bearing on climatic change. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 95: 95—110.
- Kolla, V., Moore, D. G., Curry, J. R., 1976. Recent bottom-current activity in the deep western Bay of Bengal. *Mar. Geol.*, 21: 255—270.
- Kolla, V., Pierre, E. B., 1973. Clay mineralogy and sedimentation in the eastern Indian Ocean. *Deep-Sea Research*, 20: 727—738.
- Peirce, J., Weissel, J., 1989. *Proc. ODP Init. Reports*, 121. College Station, TX (Ocean Drilling Program), 359—453.
- Raymo, M. E., Ruddiman, W. F., Shackleton, N. J., et al., 1990. Evolution of Atlantic-Pacific $\delta^{13}\text{C}$ gradients over the last 2.5 m. y. *Earth and Planetary Science Letters*, 97: 358—368.
- Ruddiman, W. F., Prell, W. L., Raymo, M. E., 1989. Late Cenozoic uplift in Southern Asia and the American west: Rational for general circulation modeling experiments. *Journal of Geophysical Research*, 94 (D15): 18379—18391.
- Shi, Y. F., Tang, M. C., Ma, Y. Z., 1998. Research on relationship between the second-phase uplift of Qinghai-Xizang plateau and the development of Asia monsoon. *Science in China (Series D)*, 28(3): 263—271 (in Chinese with English abstract).
- Stow, D. A. V., Amano, K., Balson, P. S., et al., 1990. Sediment facies and processes on the distal Bengal Fan, Leg 116. In: Cochran, J. R., Stow, D. A. V., eds., *Proc. ODP Sci. Results*, 116: 377—395.

附中文参考文献

方念乔,陈学方,胡超涌,等,2001. 东北印度洋深海沉积记录基本特征及其对青藏高原隆升的响应. 第四纪研究, 21

(6): 490—499.
施雅风,汤懋苍,马玉贞,1998. 青藏高原二期隆升与亚洲季风孕育关系探讨. 中国科学(D辑),28(3): 263—271.

(上接 134 页)

一致,保证了反演的正确。(2)反演处理. ①三维波阻抗模型的建立. 根据地层沉积模式和各地层之间及各自与上下地层的接触关系建立地质框架模型,对井以及子波进行优化,利用地震精细解释结果,标定好的优化阻抗数据和地质框架经过合理内插、外推,得到 LL 三维的低频波阻抗模型. 该模型是测井资料的内插,分辨率很高,但几乎没有地震中频成分. ②约束稀疏脉冲反演求取相对波阻抗. 利用优化后的子波和该区的低频趋势进行反演. 在编辑各井的约束条件时,除 TN23、T3、T4 三个层外,又追踪了 T4-1、T4-2 两个层并拷贝了 T4-100 ms 做为反演的 base 层,较好的控制了波阻抗变化的趋势和约束范围,同时利用 Jason 软件的质量控制体系,反复进行参数试验,选取 λ 值为 40,这时地震与合成记录的误差最小,信噪比较高,相关性好,最后生成相对波阻抗体. ③绝对波阻抗的求取. 相对波阻抗只是测井的低频和地震的中频成分,将测井的低频、地震的中频以及通过滤波得到测井的高频成分合并计算,得到绝对波阻抗体. ④效果分析. 通过上述工作后,最终得到的反演剖面,地层符合沉积规律,各层位接触关系自然. 中低频合理、高频补充适当,能够分辨出各气层的展布范围,为后续的气层追踪解释打下基础.

3 气层追踪解释及其物性预测

根据已知井气层在波阻抗剖面上的响应(反映

为低阻抗),标定出气层的顶底,追踪解释,可以看出 L2、3 井区的 II、V 气藏顶面构造图形态与 T3、T4 反射层构造图形态类似,而 L9 井中部两个气藏以及 L9 井北部的低阻抗区域延伸范围很小,没有形成规模.

针对 II、V 两个砂组和气层,采用底 T0 减去顶 T0,应用 5 口井形成的速度场将其转为深度域的值,再用实钻井进行校正的方法,获得 II、V 两个砂组的视厚度图和两个气层的视厚度图. 两个砂组的视厚度图反映出 II 砂组总体上北边砂体的厚度较大,向南呈逐渐变薄的趋势,反映在这一时期的沉积中物源主要来自北部. V 砂组从东北到北部砂体的视厚度较大,同样向南呈逐渐变薄的趋势,指示这一时期的物源来自东北部. 根据 II、V 两套气层的视厚度分布图,II 砂组的气层要比 V 砂组的气层薄,且分布范围较大,向南虽然逐渐减薄,但一直到 L6 井一带均有零星分布, V 砂组气层厚度较大,但分布范围仅限于 L2、2-2、2-1 和 L3 井一带.

通过把波阻抗与储层孔隙度建立关系,根据所追踪气层顶底的合理时窗范围,得到的平均孔隙度平面分布图反映出,储层的物性分布特点与气层的分布特点类似,II 砂组物性较好的区域在 L2 井一带,向南到 L6 井区孔隙度也较大,而 V 砂组物性较好的区域仅限于 L2、2-2、2-1 和 L3 井一带,向西、南、北三个方向均迅速变差.