第38卷 第4期
1992年7月
地 质 论 评
GEOLOGICAL REVIEW
Vol. 38 No. 4
Jul. 1992

Rivière粒度资料解释法在孟加拉深水扇积物流体动力分析中的应用

方 念 乔

（中国地质大学，北京）

Rivière粒度资料解释法以数学方法模拟实测粒度累积曲线、并援用若干曲线特征参数判别沉积物形成的流体动力条件，是独树一帜且甚有成效的环境分析方法之一。孟加拉深水扇细粒沉积物经此方法检验，表明半远海环境构成了该深水扇的沉积背景，在此背景下，穿插有低密度阵发性浊流的直接生成物或出现沉积物受等深流的局部改造。总体能量较弱的流体动力环境有利于该地区正常地层记录的保存。

关键词 孟加拉深水扇 细粒沉积物 粒度相 流体动力分析

1 沉积物一般特征

孟加拉深水扇是世界最大的浊积体。但是正如W. R. Normark[1]所指出的，该深水扇的粗粒沉积物非常缺乏，除了主要活动沟道的深海钻探资料曾揭示若干重要的砂质浊积单元外[2]，扇体主体特别是在中下扇区，一般由质地均匀的细粉砂质粘土所组成。

深海细粒沉积物可据其沉积机理分别概括为浊积、等深积和远海/半远海等三相[3]。其中，人们对半远海沉积相（hemipelagic facies）的理解并不完全一致。作者认为，它形成时的垂向加积方式应与远海相无异，但所包含的大量粉砂质泥质陆屑组分，或多或少仍与浊流、等深流的携运和簸扬有关。

作者研究的MD 77181、MD 77183、MD 77190等3根活塞岩芯采自孟加拉扇的中、下扇区，地理部位、水深和岩芯长度如表1所示。岩芯揭示的沉积物主色调为灰绿、灰褐或橄榄灰色。沉

表 1 MD 77181等3岩心位置和长度

Table 1 Broad situation of three cores from the Bengal Deep-water Fan

岩心编号	经 度	纬 度	水深（m）	岩芯长度（cm）
MD 77181	90° 29′1 E	17° 23′7 N	2 271	1 396
MD 77183	91° 43′0 E	15° 09′0 N	2 632	1 058
MD 77190	87° 49′6 E	7° 41′0 N	3 742	1 200

注：本文系作者在1986年撰写的博士论文基础上抽取部分内容，经进一步分析整理而成，深海岩心保存于法国科研中心弱放射活动研究中心，粒度测定工作在巴黎十一大沉积岩实验室和里尔一大沉积和地球化学实验室完成，计算和作图软件由巴黎十一大沉积岩实验室提供，部分内容曾与该室F. Baltzer博士和巴黎国立自然历史博物馆地质研究所A. Foucault博士进行讨论。

本文1990年10月收到，1991年11月改回，罗正华编辑。

积物的泥质(<3.9 μm)组分含量一般为 40%—70%，细粉砂质(3.9—30 μm)组分为30%—50%，粗粉砂质至细砂质（30—200 μm）组分多在 10%以下，且粗屑部分以硅钙质生物遗骸为主。沉积物整体组成与 D. A. V. Stow 和D. J. W. Piper[4]描述的半远海沉积物无异。本区的半远海沉积物在颜色、结构和构造诸方面相当均匀一致，即使其中穿插一些厚度为 1—100 mm 的粗粉砂级（>50μm）以上的硅铝质陆屑夹层，多数情况下亦肉眼难以辨别。为正确认识总体面貌非常单调的细粒沉积物的沉积机制，作者采用 Rivière 法为 3 根岩芯作了粒度研究。

2　工作方法简介

沉积物样本经加热和双氧水处理，去除有机质并使之充分分解，大于 50 μm 的粗粒部分分 5 级（50、80、125、160、200 μm）进行筛析，小于 50 μm 的细粒部分则采用 5000D 自动沉降仪（sedigraphe）分析。该沉降仪依据斯托克沉降公式，以一束X射线扫描单位时间内悬浮物的沉降量，沉降仪所附设的绘图设备在扫描同时给出平滑的粒度累积曲线。

粒度资料的分析解释采用法国A. Rivière 创立[5]、经他本人及合作者[6,7]改进的粒度演变参数法（la méthode des indices d'évolution granulométrique）。简言之，该方法将函数关系式 $y=ax^N+b$ 表达的数学理论曲线逼近实测粒度累积曲线，藉拟合过程中所援用的若干决定曲线形态的特征值，判断物质搬运和沉降的水动力条件。特征值中，指数N是描绘曲线轮廓、方向和凸度的基本参数。其他较重要参数还有曲线水平宽度值G（即截去首尾余量的粒度分布范围）和平均粒度值$\bar{X}$（以颗粒直径u的对数形式 $\lg\frac{u}{100}$ 表示）。据 Rivière[6]，N值自公式 $y=(100^{NX_i}-1)/(10^{NG}-1)$ 推导而来。选取以粒度累积百分数为代表的纵轴（y）和以对数形式表达的粒度为代表的横轴（X）所构成的直角坐标系，据实际情况选择粒度范围即X轴上的宽度G，将粒度值X_i及其对应的累积百分含量代入公式，求得局部Nm值并累加平滑即得到反映粒度累积曲线基本特征的N指数。

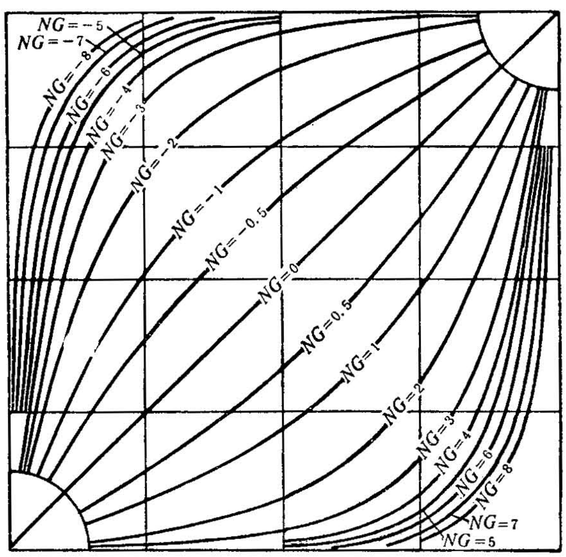


图 1　确定N指数的标准曲线图解（据 A. Rivière, 1953）

Fig. 1　Canonical curves' abacus for the determination of N index (after A. Rivière, 1953)

显而易见，公式 $y=ax^N+b$ 可代表一簇曲率不同的曲线。当N（或NG，下同）>0 时，为双曲线型；$N\simeq 0$ 时，为对数曲线型；$N<0$ 时，为抛物线型。Rivière 法早期应用中的标准曲线样板图解即具体体现了这些性质（图 1）。相应地，粒度累积曲线符合上述N特征值的沉积相，分别被称为双曲线相、对数曲线相和抛物线相。系列实验表明，双曲线相代表载体速度、紊度降低时，超荷负载形成并迅速卸载的急流型沉积。对数曲线相为介于双曲线相和抛物线相间的过渡状态，代表载体能量衰落阶段以粉砂质泥质微细颗粒为主的沉积。至于抛物线相，一般为滞水或极平缓水流的滗析（decantation）产物。

据指数N划分的粒度曲线相和沉积类型间的对应关系，以简化形式列于表2。在许多情况下，同一沉积机制作用下的粒度相因空间、时间的不同而变化，并非一成不变地单独对应某种沉积作用。

表 2 粒度曲线相和沉积类型的对应关系（据 F. Baltzer，1980）

Table 2 Correlation between the Rivières granulometric facies and the sediment types (after F. Baltzer, 1980)

指数 N	曲线形态		粒度曲线相和沉积类型
	方向	弧度	
>1	向上	很强	超双曲线相；混杂堆积、滑塌、漂砾、泥石流
$=1$	向上	强	线性相关型双曲线相；上述过程的衰退阶段
$0<N<1$	向上	一般	双曲线相；超负荷沉降，包括涨水、湍流、浊流等
$=0$	直		对数曲线相；与负载水体平衡，三角洲、滨海、泻湖以及河流的淤泥等
<0	向下	一般	抛物线相；淅析沉积，湖沼滞水和静海中的悬浮物沉降
<-1	向下	强	超抛物线相，仅在粒度曲线的部分段落出现

3 孟加拉扇细粒沉积物的粒度曲线相

作者共分析120余个晚更新世以来的沉积物样品。3种典型的粒度曲线相在本区均有发现，但出现机率相差很大，且对其成因须作具体分析。

大约5/6的样品的N值约等于零即呈现所谓对数曲线相，应为强劲水动力条件转趋衰弱的产物。3根岩心虽在粒度分布上存在差异[8]，但大多数粒度曲线相的参数特征表明，由频繁事件（浊流、等深流活动）触发的雾状层（nepheloid layer）持续遮复广阔扇区，从而呈现以垂向加积方式为主的沉积背景。双曲线相仅在中部扇区的MD 77181、MD 77183岩芯的局部出现，所对应的常为细砂或粉砂质薄层，应是饱和状态的低密度流于能量减弱时迅速沉降或经过等深流簸选的组分，可以反映异常事件的频度和强度。至于真正的抛物线相，是否在本区存在尚有疑问；该相仅见于下扇区MD 77190岩芯的部分区段，虽可能与其地处下游、水动力条件更弱有关，但由于显示抛物线相的样品往往混有许多生物碎屑，不能以纯粹的水动力成因进行解释。

4 N值垂向演变及其地质意义

作者对MD 77181等3根岩芯的代表性区段高密度取样，通过粒度测定致力观察指数N的垂向演变特征，在前文述及的确认本区细粒沉积物大多为半远海成因外，进一步辨认出与之共生的几种沉积机制。

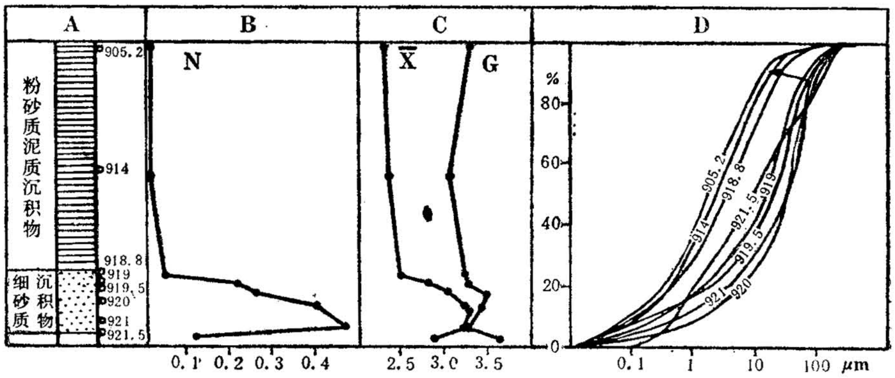
4.1 浊积段

以MD 77181岩芯905.2—921.5cm（数字和量度代表至岩芯顶部的距离，下同）为例。

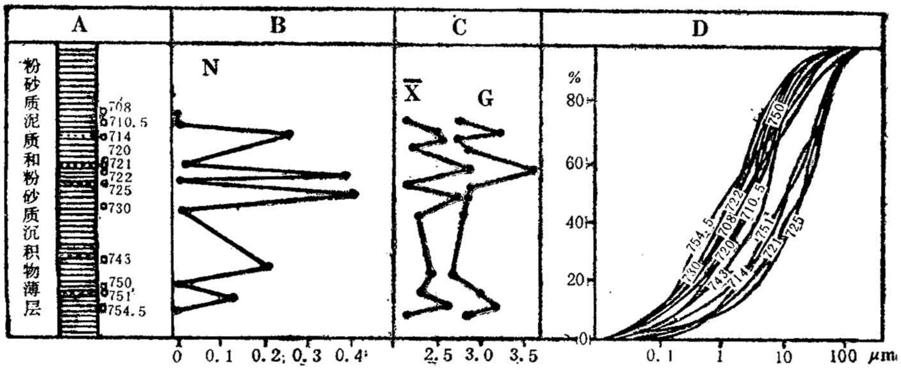
本段底部为一数厘米（918.5—921.5 cm）厚的细砂粉砂质薄层，向上渐变为粉砂质泥质均匀厚层沉积物。砂层颜色略深，是岩芯中少量肉眼易识的夹层之一。经Rivière法检验，主要包含以下特征（图2，上）：

1. N值最高峰贴近砂层底界（921 cm），代表粗粒组分优先沉降的相对高能环境。

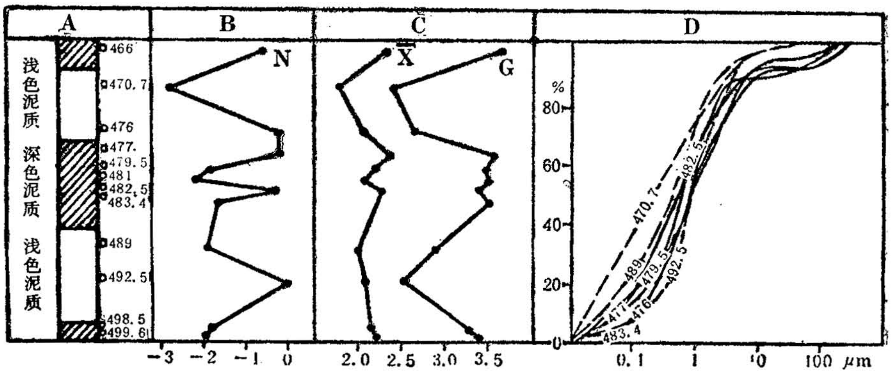
2. N值自921 cm向上迅速降低，至918.8 cm时虽仍为双曲线相，但弧度变小，水动力条件



（上）　MD77181



（中）　MD77183



（下）　MD77190

图 2　孟加拉扇若干典型细粒沉积物段的粒度分析特征（Rivière 法）

Fig. 2　Grain-size parameters of the typical fine-grained sediment sequences in the Bengal Fan(with the Rivière's method)

A—沉积物柱及取样部位；B—N值；C—$\overline{X}$和G值；D—粒度累积曲线

逐步衰退的演化线索非常明显。

3．本段上部泥质层（914 cm、905.2 cm）的N值趋近于零并保持稳定。这部分的粗粒物质完全由生物碎屑而非硅铝质陆屑构成，表明已基本脱离脉动浊流的直接影响而转入正常的半远海

沉积。但是由于N值始终不低于零，即没有象其它地区的半远海沉积物那样出现抛物线相[9]，可能与孟加拉扇（特别是中上陆坡）经常保持一个相对高的水动力环境有关。

4. 砂层最底部（921.5 cm）的N值较上覆沉积物明显偏低，而反映样本粒度范围的G值更高，很可能是浊流活动侵扰下伏半远海沉积物并与之部分混合的结果。

粒序结构为浊积物显著特征之一。N值和其它粒度指数的垂向演化，比单一的粒度曲线相应具有更明确的指示沉积机制的意义。但是，象本浊积单元这样N值演化线索清晰的区段，在孟加拉深海扇细粒沉积物中并不多见。作者重点分析的 3 根岩芯和本区大多数活塞岩芯中，类似的薄层浊积物仅见于靠近上扇区的 MD 77181 岩芯，而且几乎全部集中于据$\delta^{18}O$曲线所划分的冰期和冰亚期内[8]，从而从一个侧面反映了浊流活动与扇体部位和冰川性海平面升降间的关系。

4.2 等深积段

以 MD 77183 岩芯 708—754.5 cm 为例。

本段沉积物的颜色、粒度粗略看去比较均一，有时隐约可见其中包含有厚度不超过 0.5cm 的砂质层。

N值的分布范围较上述 MD 77181 岩心的浊积单元的N值略小且$\bar{X}$值更低，一般说来，这是 MD 77183 岩芯位于 MD 77181 岩芯的下游地区的合乎逻辑的结果。本段N值垂向变化的主要特征在于经常在双曲线相和对数曲线相间作大幅度摆动，完全不存在递变现象(图 2，中)。N值的频繁突变，本质上反映分异度较高的粉砂质泥质沉积物和砂质沉积物呈薄层相互叠置，这种构造特征更多地表现出等深积色彩[10]。与之相关的佐证是，本段内无论砂质或泥质样品，$CaCO_3$ 含量一般仅为 0%—2%，远低于大部分区段 5%—15%的正常值；钙质生物壳溶蚀严重，电气石、针铁矿等重矿物或铁锰质矿物微粒时有所见；由 *Globigerinoides ruber* 记录的 $\delta^{18}O$ 曲线也呈明显畸变[8]。笔者认为，以上特征集中反映了等深流对沉积物的机械和化学的双重改造。在孟加拉湾深海细粒沉积物中，这种改造对远海/半远海正常地层记录的干扰往往较低密度浊流更强。具有类似特征的等深积物在本区岩芯中均可发现，但尤以 MD 77183 为最。在此岩芯内，未见有如 MD 77181 的N值演化趋向明显的浊积段，而在半远海沉积物中大量穿插那些我们认为属等深积成因的薄层。D. A. V. Stow 和 D. J. W. Piper (1984) 指出，泥质等深积物具抛物线相，浊积物和细砂质、粉砂质等深积物则均为双曲线相[4]。事实上这两类深海细粒沉积物的粒度相并非不可区分，特别在相的垂向变化上应该说各有特点。作者在本文中所提供的仅为一例而已。

4.3 半远海沉积物中的韵律层

以 MD 77190 岩芯 466—499.6 cm 为例。

MD 77190 岩芯中上部普遍存在灰褐色（深）和灰色（浅）沉积物韵律互层，总厚逾 6 m，单层厚度仅为 0.1—25 cm。两种沉积物的硅、钙质生物碎屑和 $CaCO_3$ 含量的差异非常明显[8]，作者截取其中一段进行粒度分析(图 2，下)。

此岩芯的深度及与陆缘的距离，远较 MD77181 和 MD77183为大（表 1），因此N值和 $\bar{X}$ 值都比较小，并经常展现抛物线相，指示水动力强度大为削弱，沉积背景方式以静水滗析（décantation）为主。两种沉积物细粉砂和泥质部分的粒度特征其实非常相近，但深色沉积物因生物砂丰度较高而增大了平均粒径$\bar{X}$和粒度范围G，同时也改变了粒度曲线形态，使N值发生变化。浅色沉积物的 $\bar{X}$ 和G值都较低而且变化幅度不大，但N值两次出现自中下部零值到上部负值间的定向演化，带有某种 MD 77181 岩心浊积段的意味，只是因远离陆源碎屑发散中心而显示载体的能量更低、沉降的颗粒更细，粒度相的垂向转换也由对数曲线相→抛物线相代替了双曲线相→对数

曲线相。如果这种推测成立，则 N. A. Rupke 和 D. J. Stanley (1974)[11]关于富含 $CaCO_3$ 和生物砂的深色沉积物代表 Bouma 序列顶部的泥质远海沉积 (E_p)、贫 $CaCO_3$ 和生物砂的浅色沉积物代表泥质浊流沉积 (E_t) 的论点，可以得到孟加拉深水扇粒度资料的支持。

以上所分析的段落对 3 根岩芯分别有代表意义（图 3）：MD 77181 的细砂、粉砂质夹层多属浊积物；MD 77183 的砂质层则似乎仅与等深流活动有关；MD 77190 虽仅底部出现浊积砂质层，但可能与不同水能环境有关的泥质沉积物韵律层的存在也是需要探究的问题。3 根岩芯反映孟加拉深海扇大面积地以半远海沉积方式为背景，但不同部位所蒙受的阵发性扰动各有特点。进一步的研究表明，MD77181岩芯的浊积层绝大部分产于冰期或冰亚期，而MD 77183 的等深积层的发生频度与冰期和间冰期的交替不存在明显的对应关系。除了直接的浊积证据外，冰期内浊流活动的加剧还强化了扇体垂向加积过程的物质补给，使得 3 根岩芯的陆屑沉积通量无一例外地对应于气候期的变化[8,12]。

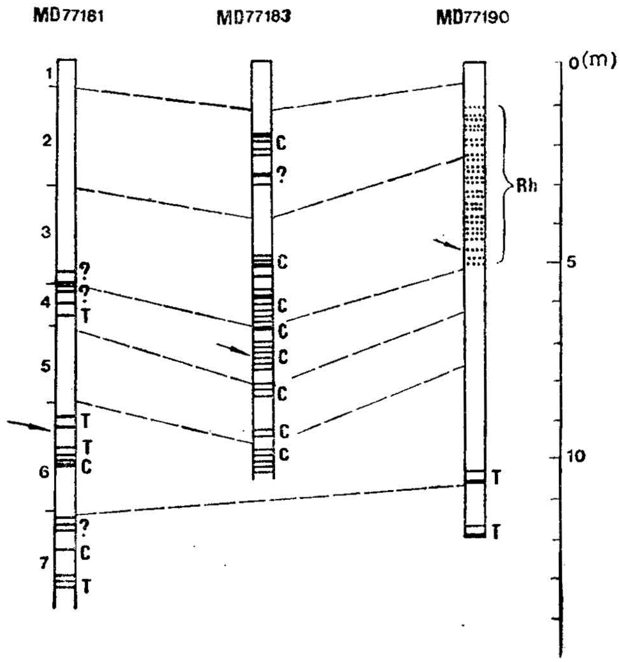


图 3　不同成因的细粒沉积物层在孟加拉深水扇 3 根岩心中的分布

Fig. 3　Distribution of the fine-grained sediment layers caused by the different hydrodynamics in three cores from the Bengal Deep-water Fan

图中T代表浊积层，C代表等深积层，Rh 代表 MD 77190 中的泥质沉积物韵律互层。箭头指示本文详细分析的段落所在的部位

5 讨论

Passega 的$C—M$图[13]在粒度资料的解释即沉积物水动力机制的判别上，获得广泛应用并常可收到良好效果。但由于仅引用第一百分位数和中值两个参数而可能丢失分析问题的某些基本信息[6]。孟加拉扇上述各种类型的细粒沉积物，投点于Passega 图后(图 4)，除具有粒序特点的浊积段构成一个并不怎样平行于 $C=M$ 线的狭长区域外，其余样品投入的范围在形态和位置上都可划入静水沉积一类，难以给予细致区分（这种情况，当然，在某种程度上也与不易把握一组样品是否受控于同期次流体动力作用有关）。相比之下，用数学方法模拟实测粒度曲线，引入描绘曲线形态的特征参数以判别沉积环境和解释沉积过程，不失为解决问题的方向之一。

但是，含有许多粘土组分的细粒沉积物的粒度分析包含若干较突出的难点。例如，粘土的运移和沉降往往与化学凝絮作用及微体动物的摄食、排泄作用有着密切联系，但在粒度分析过程中一旦经过充分分解，微细质点的体积、重量和在沉积物中的含量已不足以正确反映沉积期间的流体能量。此外，明显不受水动力条件支配的生物砂，应在粒度分析中予以剔除。但是考虑到这部分物质同样可能经历再沉积作用，而且生物砂含量常可作为浊积泥与远海/半远海泥的重要分辨标志[11,12]。有鉴于此，我们有意识地保留了生物砂组分以观察多因素复合机制对数字粒度曲线

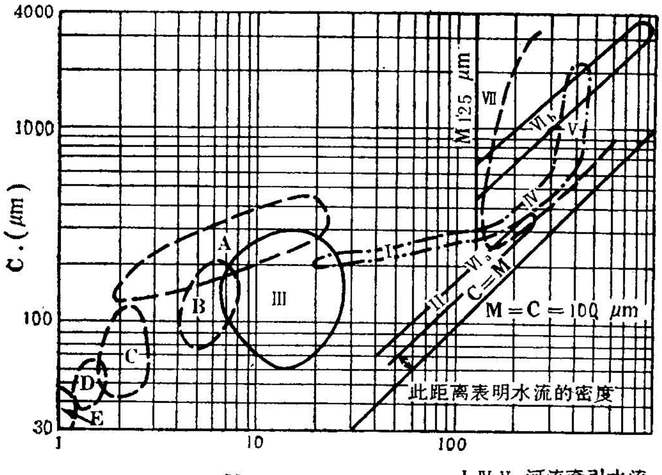


图 4 孟加拉扇深水细粒沉积物和C—M基本图形

Fig. 4 *C-M* diagram(R. Passega, 1957)[14] with envelopes ploted according to the grain-size data of deep-water fine-grained sediments from the Bengal Fan

底图据R. Passega(1957)。本文分析的细粒沉积物投点区：

A) MD 77181 的浊积段；B) MD 77183 的等深积段；C) MD 77181 和 MD 77183 主体部分的半远海沉积；D) MD 77190 深色沉积物段；E) MD 77190 浅色沉积物段

参数特征的影响。

6 结论

孟加拉深水扇广阔区域的细粒沉积物及其粒度分析结果显示，这个扇在空间和时间上的主体部分应处于一种低能环境。建造扇的巨量陆屑，实由浊流及等深流活动所触发的弥散在陆坡上的雾状层垂向加积所形成。在这种半远海沉积背景下，穿插有低密度阵发性浊流的直接生成物和等深流的局部改造。Rivière 法对于深水细粒沉积物的粒度资料解释，可产生独特的良好效果。

参 考 文 献

1 Normark W R. Fan valleys channels and depositional lobes on modern submarine fans: characters for recognition of sandy turbidite environments. Am. Ass. Petr. Geol. Bull., 1979, 62: 912—931.

2 Moore D G, et al. Stratigraphic seismic section correlations and implications to Bengal Fan history. In: Deep Sea Drill. Proj., Initial Rep., 1974, 22: 403—412.

3 Stow D A V. Fine-grained sediments in deep water: an orientation of processes and facies models. Geo-Mar. Lett., 1985, 5: 17—23.

4 Stow D A V, Piper D J W. Deep-water fine grained sediments: history, methodology and terminology. In: Stow D A V, Piper D W J, eds. Fine-Grained Sediments: Deep-Water processes and Facies. Oxford: Blackwell, 1984. 111.

5 Rivière A. Expression analytique générale de la granulométrie des sédiments meubles. Bull. Soc. Géol. Fr. 1953, 6, II: 155—167.

6 Rivière A. Méthodes Granulométriqes: Techniques et Interprétations. Paris, New York, Barcelone, Milan: Masson, 1977. 170.

7 Baltzer F. Géodynamique de la sédimentation et diagenèse précoce en domaine ultrabasique-Nouvelle Calédonie. Paris: Trav. & Docum. O. R. S. T. O. M. 152, 1980. 283.

8 Fang N. 1987, Le controle climatique de la sédimentation quaternaire récente dans la région moyenne du cone profond du Gange (Océan Indien). Thèse du Doctorat de l' Univ. P. et M. Curie, 1987. 159(index)

9 Foucault A, et al. Turbidites et hemipelagites de la Ride du Var. Bull. Soc. Geol. Fr., 1986 (8), II (4): 675—679.

10 Hollister C D, Heezen B C. Geologic effects of ocean bottom currents: western North Atlantic. In: Gordon A L, ed. Studies in Physical Oceanography. New York: Gordon and Breach, 1972.

11 Rupke N A, Stanley D J. Distinctive properties of turbiditic and hemipelagic mud layers in the Algero-Balearic Basin, western Mediterranean Sea. smithsonian Contrib. Earth Sci., 1974 13: 39.

12 方念乔．恒河深海扇东北区域晚第四纪气候和海平面变化对沉积作用的控制．现代地质，1990，4(1)：10—22.

13 Passega R. Grain —size representation by CM patterns as a geological tool. Journ. Sed. Petr., 1964, 34: 840—847.

14 Passega R. Textures as characteristic of clastic deposition. Bull. Am. Ass. Petr. Geol., 1957, 41: 1952—1984.

THE APPLICATION OF THE REVIERE GRANULOMETRIC METHOD TO THE ANALYSIS OF THE FINE SEDIMENTS OF THE BENGAL DEEP-WATER FAN

Fang Nianqiao

(*China University of Geosciences, Beijing*)

Abstract

Homogeneous silty and clay sediments occupy a decisive position in the distal environments of the Bengal Deep-water Fan. Using the Reviere granulometric technique wich can play a salient and practical role in interpreting the hydrodynamic mechanisms of varied sedimentations, the author sums up in this paper some facies characteristics of the fine-grained sediments cored from the distal regions of the Bengal fan. It seems that terrigenous hemipelagites deposited by slow vertical setting constitute the background of the sedimentary sequence and that fine-grained turbidites and contourites, as secondary constituents, lie scattered in the sequence. By and large all those three deep-sea sedimentary facies resulted from the weak hydrodynamic environment and do not make an evident disturbance to the normal stratigraphic records in the regions under study. Results of grain-size analysis and other technical data concerning the sediments indicate the occurrence frequency of the turbidite and contourite layers is related to the geographical location of the cores and particularly to the climatic evolution since the Late Quaternary.

Key words: Bengal Deep-water Fan, fine-grained sediments, granulometric facies, hydrodynamic analysis

作 者 简 介

方念乔，男，出生于1950年1月，湖南岳阳人。1987年巴黎居里大学获地质学博士学位；专长沉积学、地层学和海洋地质学，现任中国地质大学(北京)大地构造研究室副教授。通讯处：北京市学院路29号中国地质大学，邮政编码：100083。