

# 细粒浊积体研究现状与展望

姜 涛 解习农

(中国地质大学资源学院 湖北 武汉 430074)

**摘 要** 本文简述了浊积体的研究历史,分析了细粒浊积体的特点、形成过程、相模式、石油地质意义及其识别技术等方面的研究现状和新进展。指出目前所存在的问题及将来的研究方向。

**关键词** 细粒浊积体 浊积岩 相模式 储层结构

## Present Condition and Prospects of Researches on Fine-grained Turbidite Systems

JIANG Tao XIE Xinong

(College of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei, 430074)

**Abstract** The identification of thin-bedded fine-grained turbidite reservoirs has come true with the improvement of the exploration technology. Internationally, there have been increasing interests in this aspect, and much progress has been made in the last several years. Nevertheless, exploration of hydrocarbon in deep-water turbidite deposits has not yet been started in China. This paper describes the history of turbidite researches, and analyses its depositional features, formation processes, facies models, reservoir values and some recognition techniques. Some existing problems and future research aspects are also pointed out.

**Key words** fine-grained turbidite systems turbidite facies model reservoir structure

世界上许多盆地都有浊积岩储层,据不完全统计,深水浊积体和相关沉积体系中已发现和投产的油田有 1 200 ~ 1 300 个。在过去二三十年中,各种规模的浊积体油田的发现和开发都呈现了快速增长的趋势,该趋势还将继续下去(Dorrik, 2000; 赵文智, 2000; 孙龙德, 2000)。由于细粒浊积体常与远洋泥岩和半远洋泥岩互层,具有非常有利的生储盖组合。因此,随着油气田勘探开发的深入和勘探技术的提高,近年来对薄层细粒浊积体的研究也越来越受到沉积学家和石油地质学家的重视。

## 1 浊积体研究简史

现代对深海碎屑沉积物的研究是随浊流概念的产生而兴起的(Reading, 1985)。19 世纪 80 年代就已经有人认识到密度底流的存在部分是由于沉积物的悬移运动产生的。最初,浊流被认为是稀释的低密度流,主要携带粘土和粉砂。当时,人们主要对它的侵蚀能力较感兴趣,Daly(1936)应用浊流解释了海底峡谷的成因。1938 年 Johnson 引入了术语“浊流”来称呼这种流体,并把浊流沉积物称作浊积岩。1950 年 Kuenen 在一系列水槽实验中,证明了浊流不仅可以携带粘土和粉砂,而且还能携带砂的时候,人们对浊流的兴趣就

改变了。该阶段是以 Kuenen 等的论文——浊流是递变层理的起因为标志的。浊流把沙带入深海环境的这种理论,排除了复理石序列中砂岩-页岩互层必须由垂直构造运动所产生的看法。1962 年鲍马在他的博士论文中应用浊流理论提出了被称为“鲍马层序”的著名浊流层序模式(Bouma, 1962)。总之,早期浊流理论革新了对碎屑沉积物的研究,促进了深海环境的海洋沉积学研究。

20 世纪 90 年代以来,为了在被动边缘(如巴西、墨西哥湾、西非、北海)的细粒浊积体中寻找隐蔽油气藏,工业界和学术界联合起来研究细粒浊积体的沉积物搬运和沉积过程、沉积物分布样式、扇体的形成过程以及储层结构,其中主要包括用层序地层学原理和储层结构原理重新解释了大量露头、通过做新的实验(如滑塌实验)和数值模拟来研究沉积物在重力流作用下的搬运和沉积过程以及对深海砂体的完整描述等。通过以上这些研究,说明了深海沉积物(尤其是砂级部分)在与粗粒富砂的浊积体比较时,在研究方法和沉积物构成上存在着根本差异(Weimer, 1991; Weimer, 1994; Pickering, 1995; Prather, 1998)。

## 2 浊积体的分类及其特点

许多学者在研究浊积体过程中提出了分类方案(Shan-

mugan,1999),但这些模式却不统一,1982年,在加拿大召开的国际会议试图确定一个统一的模式,但未成功。这是因为影响沉积物搬运和沉积的因素很多,且在特定的扇体内其重要程度又有所不同。目前对某一地区浊积体的研究,一般是首先根据 Mutt(1992)提出的原则进行判断,然后按照 Reading等(1995)所提出的分类方案,根据沉积物的粒度(泥型、砂泥型、砂型、砾型)和供给体系(点源、多源、线源)将其分为12类。其中,较重要的2种类型分别是点源的富泥型和富砂型,二者之间的区别见表1。

表 1 细粒泥质浊积体和粗粒砂质浊积体比较表  
(据 Bouma 2000 修改)  
Table 1 Generalized differences between fine-grained ,  
mud-rich and coarse-grained sand-rich turbidite  
system( after Bouma 2000 )

控制类型和特点	粗粒砂质浊积体	细粒泥质浊积体
构造影响	强	弱
盆地位置	一般为陆壳	一般为洋壳
盆地类型	中、小	中、大
陆上搬运距离	很短	长
海岸宽度和类型	窄(多为山)	宽而平
陆架宽度	一般较窄	一般较宽
可容纳空间	中到小	大
砂泥比	高	相对较低
主要颗粒大小	中粗砂	细砂到粉砂
沉积方式	前积	多支流沉积体系
重力流大小	一般较小	一般为中等到大
夹层泥岩厚度	薄	中等到厚
浊积复合体砂泥比	高	低到中等
主河道大小	中、小	大
支流的发育	好	较好
供给类型	峡谷供给	三角洲供给
堤沉积物类型	砂和淤泥	薄砂泥层
堤沉积结构	平行、波状纹层和 爬升波痕	平行、波状纹层和 爬升波痕
中扇砂泥比	高	低
外扇砂泥比	逐渐降低	高
重力流方向	从平行到沿岸	常被离海岸
海平面变化影响	小到中等	大
峡谷充填物	砂或泥	一般为泥
储层意义	极好	很好

3 浊积体的形成

3.1 影响沉积物搬运的因素及其层序地层学意义

浊积体的形态和特点取决于物源区的特点及其所经历的搬运和沉积作用过程。Stow 等(1985)曾绘制了一张关于沉积物源区、搬运和沉积作用的影响因素表,以此来说明浊积体主要受构造、气候、沉积物以及海平面变化的影响。但无论从沉积环境还是从沉积特征对浊积体进行分类,都会有一些过渡类型出现,甚至有矛盾的情况。一般情况下,粗粒浊积体发育在主动边缘环境,而细粒浊积体发育于被动边缘环境,但在南非 Tanqua 和 Laingsburg 拗陷内的海底扇由于其消减带和前陆盆地之间的搬运距离较长,虽然是主动边缘环境,但却发育有细砂岩的浊积扇(Scott,2000)。

层序地层学对于理解连续沉积单元的叠置方式有重要的作用,但是各影响因素间相互作用的时空变化多样性常被忽略(Bouma,1994)。就气候因素而言,如果海平面变化是由冰期造成的,由于冻结作用而使海平面下降,河流急剧减少。而一旦融化作用大于冻结作用,河流搬运将会起主导作用,并产生一次海进,下切谷等洼地被充填,河流三角洲中的细粒沉积物快速堆积,阻碍了孔隙流体的排放,将产生高孔隙流体压力。高孔隙流体压力会使沉积体不稳定,沿斜坡向下滑动产生块体流。高水位期的低重流条件下的情形就是这样的,但当冰川大规模融化时,形成非常大的河流,至少在河水的底部会具有超重流条件。如果其密度比陆架处海水密度高,则不会在海岸沉积太多的沉积物而是继续向盆地底部流动。由于其流速很高,所以也可能出现穿越盆地搬运的情况。此时,支流对外扇的沉积起主导控制作用。总之,气候条件决定着冰融化的强度,进而决定着河流的流动状态,例如墨西哥湾北部的大陆斜坡就是一个很好的实例(Bouma,1995)。因此,虽然人们很早就认识到了这些影响因素,但在对一个具体的研究对象建立沉积模式之前,对这些因素的影响强度及其相互关系的理解还是应该给予足够的重视。

3.2 细粒浊积体的形成

细粒浊积体通常是在被动边缘环境下形成的,以低砂泥比为特征。由于从物源区到海岸的搬运距离较长,河流的坡降很小,所以粗粒沉积物早就先沉积下来了。细粒沉积物在宽广且低缓的海岸平原堆积成三角洲,由于分流河道的改造,形成三角洲复合体。当海平面开始下降时,活跃的三角洲支流将向盆地方向延展,使三角洲进积到陆架边缘。细粒沉积物在陆架边缘快速堆积,产生高孔隙流体压力,且很不稳定,常常使陆架边缘塌落,产生滑动和滑塌,沿陆坡向下搬运沉积物,并侵蚀出峡谷(下切谷、扇谷或上扇)。盆地斜坡(常为大陆斜坡)在沉积物的搬运路线上是最陡的部位,所以在坡上重力流的流速会增加。然而,一旦到了坡底,由于坡度减缓,沉积物开始卸载并沉积,但大部分沉积物将在盆地底部沉积。在这一过程中,还将形成浊积水道和天然堤。其中天然堤是由水流溢出河道形成的,此时水流的流动状态将由湍流变为牵引流,因此在这些沉积物中会发育有波状层理和爬升波痕。同时,主水道也会逐渐变浅,产生分流水道,使得重力流从受限的流动状态逐渐过渡到不受限制的流动状态,最终发育成块状砂或沉积舌形体。这一过程已被 Pratson 等(2000)用实验模拟的方法得以证实。

4 细粒浊积体沉积相模式

细粒浊积体主要发育在有大型河流注入的盆地。体系中大量的泥使得沉积物的分布状态、地形及其内部结构都发生了很大变化,所以在分析这类浊积体时,由富砂的浊积体建立起来的沉积模式已不再适用。

最初的大型细粒泥质浊积体模式是建立在 Damuth 等(1975)对亚马逊河扇以及 Moore 等(1978)对密西西比河扇的研究基础之上的。1995年,Bouma 等综合了密西西比河扇的深海钻探资料,并对宾夕法尼亚 Jackfork 组、南非 Tanqua Karoo 盆地二叠纪的海底扇进行了比较研究之后,提出了一个细粒浊积体的沉积模式,将其分为3部分:即上扇、中扇和

下扇,并指出 3 部分之间的界线。坡底为上扇与中扇的分界,以发育宽广的浊积水道复合体为特征;中扇发育在盆地斜坡与盆地底部之间,由有堤水道和广泛的漫滩沉积组成;中扇下部的分流水道体系是与下扇的分界;下扇以发育 状砂或沉积舌形体为特点。图 1 是这种模式的示意图,图中表明了扇体中各部分的发育位置及其钻井特征。

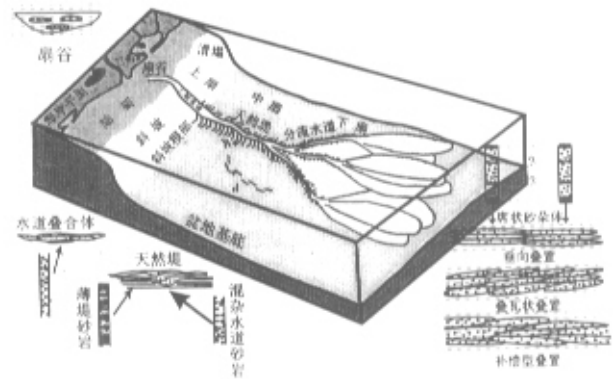


图 1 细粒浊积体沉积模式图(据 Bouma 等,1995 2000 修改)  
Fig.1 Block diagram showing the model for a fine-grained turbidite system(after Bouona et al. ,1995 2000)

5 浊积体的石油地质意义及识别技术

5.1 与细粒浊积体有关的储层类型

细粒浊积体常为三角洲沉积的二次搬运,其分选好,孔隙度也较高,是良好的储集体。与细粒浊积体有关的油气藏常为岩性油气藏,其储层类型主要是块状细砂岩或粉砂岩,具体来说,主要是浊积水道砂体、薄层天然堤、漫滩沉积和状砂。基于中扇上部的天然堤和漫滩沉积中的薄砂层,一直有人认为其不能延伸很远(Kendrick,1998),分布范围有限。但 Peakall 等(2000)研究后认为,其总体沉积厚度很大、分布的时空范围也很广,就连其中薄砂层的展布范围也很大,因此,其含油性应该要比现在所认为的好得多。墨西哥湾盆地在薄的天然堤和漫滩沉积中获得了较高的产气率就很好地证明了浊积体比测井和岩心资料所解释的连通性要好得多。这是因为天然堤虽然不稳定,在其顶部易发生滑动和滑塌,但这只是在二维剖面上中断了其连续性,对于整个天然堤沉积层来说其影响很小,空间上阻挡不了流体的流动。

Rozmar(1998)通过露头与地下地质体的对比研究,在不同尺度(岩心、井间、露头)上分析了其中影响流体流动的储层非均质性,结果表明,单个 状砂体之间呈不整合接触关系,垂向叠置在一起成为沉积舌形体,其中的冲蚀现象很普遍,提高了 状砂储层的连通性。此外,Rozman 对 Tanqua Karoo 盆地二号扇的实例研究也表明,其中的泥岩不能成为井间尺度上的隔层。因此,在评价这类储层时,应从三维上分析其空间连通性。

5.2 薄层细粒浊积体储层的识别技术及其应用

对于薄层细粒浊积体储层的识别,常规的测井和地震资料的分辨率是远远不够的。露头可以起到联系测井和地震分

辨率的桥梁作用,大规模连续露头易于定量确定地层的侧向和垂向连续性及其变化,因此,露头与地下地质体进行对比研究,将有助于更准确地确定储层性质。近年来,除了传统的露头检测手段不断改进之外,新技术也不断涌现,其中主要包括成像技术、露头测井、岩心和井间地震技术、渗透率剖面 and 地下雷达等。也正是由于有了高分辨电子测井技术(井间成像和高分辨率测井),薄层细粒浊积层才在世界上许多深海盆地被证明是有经济价值的(Hansen,2000)。甘利灯等人(2000)提出了一种基于自然电位重构声波和实测声波二次反演联合进行储层横向预测的方法来描述薄层浊积体,但其精度只有十几米。

显然,分辨率的提高对于认识储层内部结构及其性质,确定岩性圈闭和理解流动单元及整个储层的流体特征都有非常重要的意义。例如,微电阻率成像(如 FMI)能识别出厚度为 1 cm 的岩层,分辨出其粒度变化、流动特征、砂体连通性和渗透率范围等,这样就可以识别出用现代高分辨率测井也会漏掉的薄储层。这类储层在细粒浊积体是很常见的,虽然很薄,但孔渗性和连通性都很好,尤其是当总厚度很大时,可成为良好的储集体。此外,对于一些常与浊积体相伴生的滑塌造成的软沉积变形砂岩透镜体来说,在 FMI 图像上可以清楚地看到,虽然其具有很好的孔渗性和含油饱和度,但实际上是许多砂岩透镜体的垂向叠置,各透镜体之间并不连通,无法成为有工业价值的油气藏。这种情况下,即使并壁取心也会产生误导,但成像技术却可以识别出这些假象。

6 存在问题与研究方向

关于细粒浊积体的深入研究虽然只是近十年的事,但由于在油气勘探领域有重大意义,所以投入的资金和研究人员都很多,研究成果也较多,基本上对成因、形成过程、相模式及其石油地质意义都有了一定的了解。但目前还有一些关键问题有待解决:①在其成因方面,尚需研究密度和泥质含量是怎样影响浊流的行为及其沉积物的几何形态的;②对于状砂储层,在其发生侧向变化前,会有许多层叠置在一起,关于其叠置方式,Bouma(1995)提出了 3 种理论模式,但都还没被完全证实。同样,现在也还没有关于单个 状砂体之间侧向关系的资料;③尚需搞清海底微地形变化与浊积水道关系,有时在一系列叠置的 状砂的底部能看到一个水道形状的洼地。是浊积水道还是局部的洼地,现在还不甚清楚。

为了使细粒浊积体的有关理论能更好地指导油气勘探,未来的研究工作应在以下几方面有所加强:①对现代扇和内陆斜坡浊积体的多资料综合研究,对地下浊积体作进一步深入研究;②四维地震和储层监测技术的应用;③结合储层数值模拟的三维地震勘探;④人工智能,即借助神经网络的岩性解释;⑤可视化技术的大规模应用;⑥进一步加强露头与地下地质体的比较研究,重点是露头与储层的全三维量化研究,提高地震分辨率和储层属性的成像技术。

参 考 文 献

Reading H G 等编.周鉴明,陈昌明等译.1985.沉积环境和相.北京:科学出版社,463~464.  
甘利灯,陈军,殷积峰等.2000.薄层浊积岩储层地震描述方法.西北

大学学报(自然科学版) 30(2):163~167.

孙龙德. 2000. 东营凹陷中央隆起带沉积体系及隐蔽油气藏. 新疆石油地质 21(2):123~127.

赵文智, 池英柳. 2000. 渤海湾盆地含油气层系区域分布规律与主控因素. 石油学报, 21(1):10~16.

## References

Bouma A H. 1962. Sedimentology of some flysh deposits. Agraphic approach to facies interpretation, 168.

Bouma A H, H de V Wickens. 1994. Tanqua Karoo, ancient analog for fine-grained submarine fans. In Bouma A H, Weimer B F, Perkins. Submarine fans and turbidite systems: sequence stratigraphy, reservoir architecture and production characteristics. Gulf of Mexico and international: Gulf Coast Section SEPM 15<sup>th</sup> Annual Research Conference Proceedings 23~34.

Bouma A H, G H Lee, O Van Antwerpen et al. 1995. Channel complex architecture of fine-grained submarine fans at the base of slope. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions 45: 65~70.

Bouma A H. 2000. Fine-grained, mud-rich turbidite systems: model and comparison with coarse-grained, sand-rich systems. In A H Bouma and C G Stone. Fine-grained turbidite systems, AAPG Memoir 72/SEPM Special Publication 68: 9~20.

Daly R A. 1936. Origin of submarine 'canyons'. American Journal of Science, 31: 401~420.

Damuth J E, N Kumar. 1975. Amazon cone: morphology, sediments, growth pattern. Geological Society of America Bulletin 86: 863~878.

Dorrik A V Stow. 2000. Deep-water system: A new model in 21<sup>st</sup> century. Marine and Petroleum Geology, 17(2): 68~73.

Gan Lideng, Chen Jun, Yin Jifeng et al. 2000. Seismic reservoir description method in thin turbidite. Journal of Northwest University, 30(2): 163~167 (in Chinese with English abstract).

Hansen S M, T Fett. 2000. Identification and evaluation of turbidite and other deepwater sands using open hole logs and borehole images. In A H Bouma and C G Stone. Fine-grained turbidite systems, AAPG Memoir 72/SEPM Special Publication 68. U. K.: Geological Society Publishing House 317~338.

Johnson D. 1938. The origin of submarine canyons. Journal of Geomorphology, 1: 230~243.

Kendrick J W. 1998. Turbidite reservoir architecture in the gulf of Mexico-insights from field development. Developing and managing turbidite reservoirs: case histories and experiences (abs.): EAGE/AAPG 3rd research symposium, Almeria, Spain.

Kuenen Ph H, Miglioroni C I. 1950. Turbidity currents as a cause of graded bedding. Journal of Geology 58: 91~92.

Moore G T, G W Starke, L C Bonham et al. 1978. Mississippi Fan, Gulf of Mexico - physiography, stratigraphy, and sedimentation patterns. In A H Bouma, G T Moore and J M Coleman. Framework facies and oil-trapping characteristics of the upper continental margin: AAPG Studies in Geology 7: 155~191.

Mutti E. 1992. Turbidite sandstones: Milan. Agip S A. 275.

Peakall J, W D McCaffrey, B C Kneller et al. 2000. A process model for the evolution of submarine fan channels: implications for sedimentary architecture. In A H Bouma and C G Stone. Fine-grained turbidite systems, AAPG Memoir 72/SEPM Special Publication 68. U. K.: Geological Society Publishing House 73~88.

Pickering K T, R N Hiscott, N H Kenyon et al. 1995. Atlas of deep-water environments: architectural style in turbidite systems. London: Chapman and Hall 333.

Prather B E, J R Booth, G S Steffens et al. 1998. Classification, lithologic calibration, and stratigraphic succession of seismic facies of intraslope basins. Deep-water Gulf of Mexico: AAPG Bulletin 82: 701~728.

Pratson L F, J Imran, G Parker et al. 2000. Debris flows versus turbidity currents: a modeling comparison of their dynamics and deposits. In A H Bouma, C G Stone. Fine-grained turbidite systems, AAPG Memoir 72/SEPM Special Publication 68: 57~72.

Reading H G. 1985. Sedimentary environments and facies. Beijing: Scientific Publications 463~464 (in Chinese).

Reading H G, M Richards. 1995. Turbidite systems in deepwater basin margins classified by grain size and feeder system. AAPG Bulletin, 78: 792~822.

Rozman D J. 1998. Characterization of a fine-grained outer submarine deposit, Tanqua Karoo basin, south Africa. Unpublished M. S. Louisiana State University, Baton Rouge 147.

Scott E D, A H Bouma, H De Vile Wickens. 2000. Influence of tectonics on submarine fan deposition, Tanqua and Laingsburg sub-basins, South Africa. In A H Bouma, C G Stone. Fine-grained turbidite systems, AAPG Memoir 72/SEPM Special Publication 68: 47~56.

Shanmugan G. 1999. 50 years of the turbidite paradigm (1950~1990s): deep-water processes and facies models - a critical perspective. Marine and Petroleum Geology, 17(1): 52~61.

Stow D A V, D G Howell, C H Nelson. 1985. Sedimentary, tectonic, and sea level controls. In A H Bouma, W R Normark, and N E Barnes, et al. Submarine fans and related turbidite systems: New York, Springer Verlag 15~22.

Sun Longde. 2000. Depositional system and subtle reservoir in Central Uplift Belt of Dongying Sag. Xinjiang Petroleum Geology, 21(2): 123~127 (in Chinese with English abstract).

Weimer P, M H Link. 1991. Seismic facies and sedimentary processes of submarine fans and turbidite systems. New York: Springer Verlag 447.

Weimer P, A H Bouma, B F Perkins. 1994. Submarine fans and turbidite systems, sequence stratigraphy, reservoir architecture and production characteristics. Gulf of Mexico and international: Gulf Coast Section of the SEPM Foundation 15<sup>th</sup> Annual Research Conference Proceedings 440.

Zhao Wenzhi, Chi Yingliu. 2000. Regional distribution regularity and its controlling factors of oil and gas bearing series in Bohai Bay Basin. Acta Petrole Sinica, 21(1): 10~16 (in Chinese with English abstract).