

深水沉积研究前缘问题

庞雄, 陈长民, 朱明, 何敏, 柳保军, 申俊, 连世勇

中海石油(中国)有限公司深圳分公司, 广州, 510240

内容提要:深水沉积研究经历了 50 年, 争论也持续了 50 年。从浊流及鲍玛序列开始, 随着对浊流定义的过分使用, 到今天对鲍玛序列作为浊积岩相序及相关的扇模式普遍持否定态度, 深水沉积研究经历了一个认识的旋回。主要问题和争论的焦点是: 是否所有深水砂岩都是浊流成因, 鲍玛序列能否代表浊积岩相序; 是否所有的深水扇水道下方都能形成席状的、平行的、加厚的、具有丘状外形的浊积砂岩沉积; 是否可以利用地震方法识别深水扇的砂岩储层。对浊流的过分使用把深水扇模式内几乎所有深水砂岩都解释成浊流成因, 导致了曾经为之建立模式的学者纷纷撰文抛弃原有扇模式。深水沉积研究面临着对过往认识的否定和如何建立新的理论模式。

尽管浊流及相关的深水扇模式研究走向穷途末路, 石油工业却从浊流理论和相关模式中获得了许多油气发现, 勘探家们仍然希望通过这些模式寻找更多的油气, 科学理论和应用出现了极端分化的表现。

对深水沉积过程和流态的认识及沉积模式的建立是当今深水沉积研究的难点, 实现深水砂岩储层的有效预测是深水沉积研究的主要目的。我国深海油气勘探在即, 深水沉积的科学问题同样不可逾越。

关键词:深水沉积研究; 浊流; 鲍马序列; 砂质碎屑流; 深水扇模式

1 深水沉积研究历史回顾

地质学中长期令人迷惑不解的海底峡谷成因、深水环境中大套陆源粗碎屑沉积及递变层理的成因等问题, 直到上个世纪 50 年代浊流的发现及其理论的建立, 才使地质学家们得以成功地解释。浊流理论的研究为沉积学建立了新的方法学——将现代沉积、古代岩石和实验室的实验相结合的综合研究方法, 同时, 浊流理论创新了深海碎屑沉积物的研究^①。

现代沉积学以 Kuenen 等(1950)发表“粒序层理由浊流形成”一文作为发端。20 世纪 50~60 年代, 居主导地位的地槽学说以垂向振荡运动作为复理石成因的一种解释, 而很少理会浊积岩复理石的见解。60 年代后期至 70 年代初诞生的板块构造理论是地质科学的一场革命, 浊流理论很自然地融入新的地质科学理论, 而且深海大洋沉积和造山带沉积研究得到空前发展^②。

Bouma(1962)总结了一次浊流沉积垂向上的结构构造特征, 提出了鲍玛序列, 并且逐渐为大多数学

者所接受, 认为是浊积岩的经典标准层序。

总的来说, 在 50、60 和 70 年代是浊流沉积模式的建立时期。自从 Kuenen & Migliorini(1950)提出粒序层理由浊流形成(Graded Bedding in Turbidites)以来, 许多学者致力于深水沉积作用的研究, 建立了多个深水沉积的扇模式, 如, Menard(1955)的现代海底扇(Modern Submarine Fans), Bouma(1962)的浊积岩序列或称鲍马序列(Turbidite Sequence), Walker(1966)的古代扇模式(Ancient Fan Model), Jacka 等(1968)的古代扇模式(Ancient Fan Model), Normark(1970)的现代上部扇舌模式(Modern Suprafan Lobe Model), Mutti & Ricci Lucchi(1972)提出了有水道和扇舌的古代扇模式(Ancient Fan Model with Channels and Lobes), Walker(1978)的综合扇模式(General Fan Model)把 Normark(1970)现代扇模式和 Mutti 古代海底扇的相概念结合起来, 提出了含有在上扇地区的单一的补给水道和在中部/下扇地区的叠覆扇叶状体的综合扇模式, 随后, 这个综合的扇模式由于其预测能力在油气勘探上变得很有影响力。Vail(1987)的盆

注: 本文为国家自然科学基金资助项目(编号 40238060、40276019)的成果。

收稿日期: 2006-03-18; 改回日期: 2006-09-11; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 庞雄(1962—)男, 首席地质师, 主要从事珠江口盆地油气勘探研究, 通讯地址: 510240, 广州市江南大道中 168 号海洋石油; 电话 020-84262085; Email: pangxiong@cnooc.com.cn。

底扇和斜坡扇模式(Basin-Floor Fan and Slope Fan Models),Reading & Richards (1994)基于供源形式和沉积物性质把深水扇划分为 12 种模式。Dorrik A. V. Stow 和 Mike Mayall(2000)认为,只有沉积相的研究才能改进对深水扇系统的沉积模式,即需要建立深水扇系统的环境模型。

在浊积岩概念之上建立起来的海底扇模式已经成为石油工业用来解释深水模式的最有影响力的沉积学工具。基于富砂扇的研究(如,加利福尼亚远滨的 San Lucas 扇和 Navy 扇),Normark(1970)提出

了第一个被广泛应用的现代海底扇模式。他引入了“叠覆扇”以描述在现代扇主补给水道末端的下扇形成的叶状体隆起。这个形态特征可假定在上扇末端由浊流的粗粒沉积物的快速沉积形成(Normark, 1970,1978)。叠覆扇叶状体被认为是在高分辨率的地震数据上显示了总体的丘状起伏的形态,因为叠覆扇的不规则,表面产生了多样的和重叠的双曲线反射(Normark,1991)。

Mutti 和他的合作者基于在意大利和西班牙的露头研究提出了海底扇模式,使得有水道的海底扇

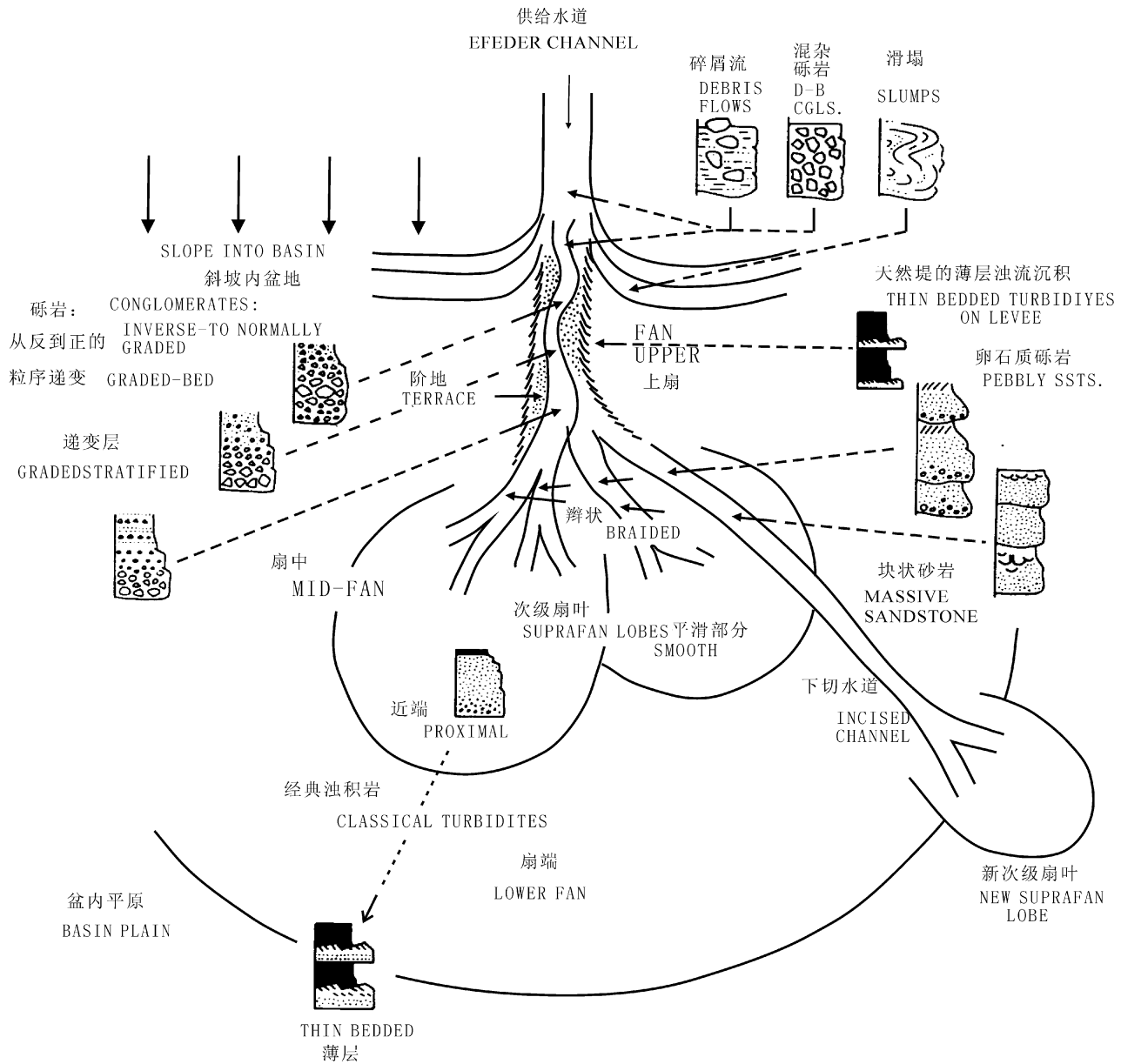


图 1 Walker (1978)的综合扇模式

Fig. 1 Generalized depositional model for a submarine fan, illustrating typical facies types (Walker,1978)

概念和在下扇环境的沉积叶状体的概念流行起来(Mutti & Ricci Lucchi, 1972; Mutti, 1977)。Mutti 和 Ghibaudo (1972)首先把“沉积叶状体”的术语应用于古深海扇层序。古代的海底扇(Mutti & Ghibaudo, 1972; Mutti & Ricci Lucchi, 1972; Mutti, 1977)叶状体的一般特征包括以下几个:(1)被认为是在其中或临近海底扇水道的入口处发展,类似于三角洲系统的分支入口沙坝,(2)基底渠化缺失,(3)通常呈现出由典型的浊积岩组成的向上加厚的沉积旋回,(4)一般的厚度范围是3~15m,(5)呈席状的几何形态。

Walker (1978)把 Nornark (1970)现代扇模式和 Mutti 古代海底扇的相概念结合起来,提出了含有在上扇地区的单一的补给水道和在中部/下扇地区的叠覆扇叶状体的综合扇模式(图1)。单源供给的海底扇模式向盆地方向显示砂体类型和储层几何特征的有序变化而具有可预测性,分为上部扇、中部扇、下部扇;上部扇可通过识别主要供给水道的存在来认识;中部扇则是网状的分流水道和相关的天然堤沉积;下部扇为舌状或席状砂。随后,这个综合的扇模式由于其预测能力在油气勘探中变得很有影响力。

有水道及水道下方发育沉积叶状体的海底扇模式建立后,使得人们对深水沉积的理解可以是有序的,有章可循的,从而实现了用模式进行预测的目的。即在可识别的水道下方将会出现席状的、加厚的、具有丘状外形的浊积砂岩沉积,同时,人们想到了把这些沉积组合通过地震手段去达到预测目的。由于深水席状砂岩具有储藏油气的潜力,所以它对石油工业有很大的吸引力。

全球石油工业界已经应用浊流理论及其相关模式获得了许多油气发现。截止2001年已经从18个盆地,>500m水深的海域获得580亿桶油当量的可采储量,当中的90%来自具有储集条件的深水浊积砂岩;为此,石油勘探家更是想方设法通过建立深水沉积模式,认识深水沉积流态,力图发现更多的浊积岩。

2 深水沉积研究之存在问题

然而,随着人们对深水牵引流沉积的深入研究,鲍玛序列的多解性显得越来越明显(图2)。从60年代中期开始,对浊流的定义和理解就富有争论(Sanders, 1965),到80年代关于鲍玛序列、扇模式和浊积岩相模式的基础性问题被提出。COMFAN

第一次会议中,(Bouma, 1983)指出现代和古代扇系统比我们预想的要复杂得多。Shanmugam 等(1985)对浊积岩相序提出疑问(Questioning of Turbidite Facies Scheme),Shanmugam 等(1990)对单点扇模式的批评(Critique of Single Fan Model),Normark(1991)还撰文放弃他1970年建立的上部扇模式(Abandonment of Suprafan Lobe Model),Walker (1992)也提出要放弃他自己在1978年建立的综合扇模式(Abandonment of General Fan Model),Shanmugam 等(1994)基于他在北海大量岩心资料观察后对盆底扇模式提出质疑(Questioning of Basin-Floor Fan Models Based on Core Data)。90年代以来,重新评价和抛弃了扇模式,重新将深水厚层浊积砂解释为砂质碎屑流的沉积物,关于高密度浊流的争论,砂质碎屑流的实验和关于地震几何学对沉积相意义的深思充满了90年代的沉积学界(Shanmugam, 2000)。

有趣的是,尽管存在这些基础问题,带有浊流水道和叶状体的扇模式还是一直支配着深水沉积学和层序地层学,并推动着深水油气勘探。

最近,对鲍玛序列各段存在不同的成因解释,如,鲍玛序列A段除浊流沉积成因外,还被解释为砂质碎屑流沉积、颗粒流沉积及次颗粒流沉积等重力流沉积;鲍玛序列B,C,D段除浊流沉积外,还被解释为深水底流沉积及底负荷的牵引产物等,显示出下部沉积物重力流沉积与上部牵引流沉积的组合特征。随着深水异地沉积研究的深入,发现在深水存在各种沉积物重力流深水牵引流沉积组合(张兴阳等,2001)。

Bouma(1997)注意到浊流中发育的牵引流沉积单元(B,C段)与浊流的最初定义是不一致的。真正的浊流(流体流)中,沉积物被湍流支撑,通常只发生悬浮沉积,在此前提下,只要沉积物沉降后不再继续搬运,沉积产物应该呈正递变。如果沉积物继续以床底负载搬运,不仅会失去固有的正递变特征,还会发育新的(再改造的)与浊流无关的波状纹层。浊流中,悬浮负荷转为底负荷后,如能形成牵引流沉积构造,是由于上覆流体驱动沉积物而形成,而不是由于沉积物驱动流体的产物,故只能归因于牵引流沉积,而不能归因于浊流沉积。所以从B,C,D段的沉积特征上唯一能得出的结论是组成这些单元的颗粒在沉积前或搬运的最后阶段是被牵引流搬运的。鉴别浊积岩的可靠标志仅仅是正递变层理(张兴阳等,2001)。

基于理论流体动力学的考虑, Kuenen(1950)提出了从滑塌到碎屑流的下坡转变, 随后其他人提出了滑塌和碎屑流到浊流的转变(Dott, 1963; Hampton, 1972)。在迁移过程中一种类型的流动(如成层碎屑流)到另一种的转变(如紊流状态的浊流)或许是过程沉积学中最重要, 至少是应充分被理解的现象。对流动改变的理解是重要的, 因为一种流动是以碎屑流模式还是以浊流模式搬运沉积物对发展地质模型是很关键的(Shanmugam, 2000)。看来重力流在整个沉积过程中存在着流态的转换, 鲍马序列可能就是沉积流态转换表现出的一种沉积形式。

因此, 随着研究深入, 就连浊流/浊积岩这样的基本概念术语都受到质疑: 鲍马序列并非由浊流作为唯一流态的沉积模式, 而是包含了沉积物被湍流支撑的浊流和床底负载搬运的牵引流沉积; 曾经把反粒序和箱状的砂岩层也作为 A 段浊流沉积被否定; B, C, D 段并非浊流成因; 深水沉积也有牵引流作用。深水沉积流态和沉积模式受到了严重挑战。时至今日, 深水沉积的研究, 特别是“浊积岩”和扇模式及与油气关系的研究仍然是沉积学研究的热点和难点。

在诸多有关深水沉积的争论中, 以 Shanmugam (2000, 2002) 的两篇文章陈述得最为清楚。

Shanmugam (2002) 认为, 在过去 50 年间, 浊积岩模式创造了许多深水浊积岩的神话: 如, ①浊流是有多种沉积支撑机制的非紊乱流体; 真相是: 浊流是紊流, 而且紊乱是其沉积机制的原则; ②浊积岩是碎屑流、颗粒流、液化流和浊流的沉积物; 真相是: 只有浊流的沉积物才能称为浊积岩; ③浊流是高速流体, 所以缺乏资料证据; 真相是: 浊流的速度在一个很大的范围之内; ④高密度浊流是真正的浊流; 真相是: Kuenen(1950)提出“高密度浊流”这一概念时, 是基于碎屑流而不是浊流, 高密度浊流是指砂质碎屑流; ⑤泥流是高密度流; 真相是: 泥流是碎屑流; ⑥槽状构造指示浊积岩沉积; 真相是: 槽状构造只能指示受到流体侵蚀, 而不能说明沉积物性质; ⑦正粒序是多种沉积事件综合作用的产物; 真相是: 正粒序是单一沉积事件的产物; ⑧交错层理是浊流的产物; 真相是: 交错层理是底层流的牵引力沉积产生的; ⑨浊积岩相模式对于说明浊流的沉积物是很有用的工具; 真相是: 作为最初发展浊积岩相模式的基础, 对法国东南部 Annot 砂岩的重复实验, 表明塑性流和底流作用导致一个复杂的沉积物; ⑩用地震相和几何形态能解释浊积岩相; 真相是: 单一浊流事件的沉积物

通常在厚度上为几厘米到几分米, 并不能提供地震数据。

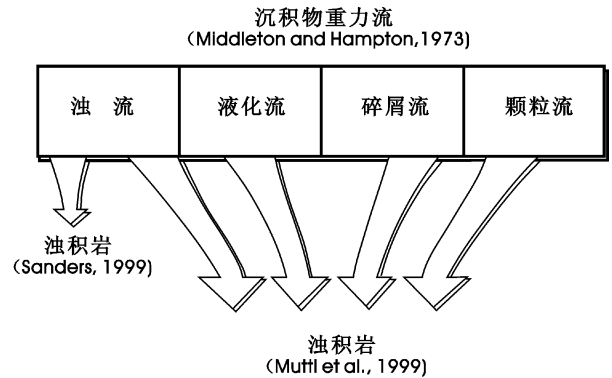


图 2 Sanders(1965)和 Mutti 等(1999)对浊积岩的不同定义(据 Shanmugam, 2002)

Fig. 2 Two differing definitions of the term “turbidites”, Sanders (1965) and Mutti et al. (1999) (according to Shanmugam, 2002)

深水沉积过程的力学原理的理解对于认识深海砂岩的输送和沉积本质相当重要, 沉积过程是建立沉积模式的基础, 在深水环境中, 沉积物重力在运输和沉积的过程中有很大作用, 主要的沉积物重力过程包括滑坡、崩塌、碎屑流和浊流, 另外, 底层流(等深流)在对深水沉积物的改造中也有重要作用。大量用于给沉积物重力过程分类的图式都是以流变学(Dott, 1963)或沉积物支撑机制(Middleton & Hampton, 1973)或二者皆有(Lowe, 1979, 1982)为基础, 分类的根本问题是单独依据沉积物支撑机制, 因为: (1) 这些分类方法通常只划分有限个类型, 然而在自然流体中涉及的支撑机制不只一个。(2) 分类中的沉积物支撑机制只用于运输过程中, 而沉积物反映在沉积过程中同样存在支撑机制。(3) 现在还没有一个标准从沉积记录中认识搬运机制(Shanmugam, 2000)。

浊流是一种有牛顿流变和紊乱状态的沉积物重力流, 沉积物悬浮于紊乱的流体。因此, 浊积岩的可靠标志是正递变层理(Shanmugam, 2000)。在牛顿流(如浊流)中, 悬浮的单个颗粒通过非受阻沉降形成沉积物, 因此, 正向粒序是浊流的特征, 指示牛顿流变和紊流(Shanmugam, 2000)。然而, 岩石记录中少有正向粒序层, 说明真正的天然浊流沉积很少见(Shanmugam, 2000)。相反, 碎屑流是一种有塑性流变和成层流动状态的沉积物重力流, 其沉积物通过凝固作用沉淀。这里碎屑流既指沉积过程又指

沉积产物(Shanmugam,2000)。

砂质碎屑流由 Hampton(1975)引入,包括以下具体参数:(1)塑性流变,(2)多种沉积物支撑机制(粘结强度、摩擦强度、浮力),(3)块体搬运方式,(4)砂和砾小于 25~30%(5)25~95%沉积物(碎石、砂、和泥)体积浓度,(6)可变的粘土含量(比重低到 0.5%)。砂质碎屑流可以在泥浆中产生,不论颗粒大小(非常细的沙到碎石)、分选(好或坏)、粘土含量(低到高)、和形态(单向和双向)。多种沉积物支持机制,例如粘结强度,摩擦强度和浮力都是为砂质碎屑流提出的。这一概念的优点是它既不要求颗粒流所需的陡坡也不要求粘结性碎屑流所需的高基质含量(Shanmugam,2000)。这样一个包含广泛的定义可能更符合现今对深水沉积的理解程度,精确得象浊流那样的术语,由于认识有限,问题多多。

在用 300 微米大小的石英砂和 5%的高岭石做所的实验中,砂质碎屑流不但发育了正向粒序,而且发育了相对纯的底部砂层。这一纯的底部砂层的产生被推测为砂粒的突然沉淀,伴随有泥质的上冲。这对发展不同的深水沉积模式有重要的启示,因为传统的看法认为只有浊积岩才能形成高质量的储集层。这个实验说明砂质碎屑流也能够形成纯的、少泥的砂岩(Shanmugam,2000)。

砂质碎屑流的内部层发育是因为在流体重新活动时沿破坏面(或次滑动面)的沉积后活动所致。这些层可能被误认为是岩石记录中的平行纹层,导致对沉积过程的错误解释(Shanmugam,2000)。

模式的作用就是预测,传统的海底扇模式的引人之处就在于砂岩储层能被预测,席状砂岩在外扇地区和分支水道前方发育,它们在地震剖面上显现为丘形,使得本不可知的深水沉积可以预测,这在深水油气勘探中显得异常重要。但是依靠一贯的模式把几乎所有海底扇深水砂岩解释

为真正的浊积岩沉积成因,这就是数十年来深水沉积研究的误区和争论焦点。

经过实践检验,不是所有的扇水道下方都发育席状砂岩,具有平行连续地震相反射也并非都有席状砂岩,并非所有水道口下方都发育扇舌叶状体的丘形。

在现代密西西比扇的外扇区域被用来进行席状几何形态的浊积扇现代模拟(Shanmugam, Moiola, McPherson & O'Connell, 1988b)。这种观点严格建立在地震剖面上观察到的平行的、连续的反射样式之上。然而,SeaMARC I A 旁侧声纳扫描调查和从密西西比扇外部一小部分的活塞取芯却揭示,密西西比扇末端的这部分不完全像以前所想的席状,而在本质上是水道和树枝状的(Twicheil et al., 1992; Schwab et al., 1996)。而且,取自密西西比扇外部的水道活塞取芯和重力取芯揭示,水道大部分充满了碎屑流;浊积岩尽管也存在但不是占主导地位的。真正的“沉积叶状体”在密西西比扇外部是不存在的。换句话说,曾经被认为是密西西比扇非水道的浊积岩叶状体,现在已经被重新解释为水道充填碎屑流(Shanmugam,2000)。

然而,笔者认为,如果重力流的物质以泥质占优势,那么整个沉积仅在水道部分才可能有砂岩,在水



图 3 西藏日喀则深水扇席状砂岩(庞雄,2004 拍于西藏日喀则)

Fig. 3 Deep-water fan sheet sandstone of ShiGaTse, Tibet

(Photo shot by Pangxiong,2004)

道口外不存在叶状体的席状砂。现代密西西比扇就是以泥质为主,显然,Shanmugam 以一概全地得出的结论是片面的。例如西藏的日喀则扇(图 3),席状砂岩就绵延十数千米稳定不变。在深水扇内,具有十数千米稳定分布的席状砂岩层组肯定是存在的,一组足够厚的具有比较一致的波阻抗值的地层显然能形成席状的、平行的、连续的地震反射相。水道口外的席状砂岩的确存在,问题在于并非所有扇水道口都能发育席状砂岩。看来在研究深水沉积过程的同时,必须研究深水沉积物的供源体系,这样才能对建立的沉积结构模式内的充填物有正确的理解。

传统概念上的海底扇模式,以丘形地震相,席状浊积砂岩为特征(Vail 等, 1991)。然而, Normark (1991)完全放弃了他的“叠覆扇叶状体”的概念, Normark (1991)在将“沉积叶状体”应用于现代 Navy 扇时出现了主要问题。这是因为现代 Navy 扇的叶状体还没有钻探到足够的深度以建立真正的沉积叶状体的加厚的趋势和席状的特征。而依据定义,沉积叶状体以典型浊积岩为特征(Mutti, 1977),加厚的趋势一直是重要的用来认识沉积叶状体的标准(Mutti, 1977)。

Walker (1992a)也放弃了他的综合扇模式,“水道—沉积叶状体类型的海底扇模式,在它的时代是有影响力的,但是现在过时了,因为它忽略了外部的控制,特别是海平面的升降”。丘状起伏的地貌形态也不是以浊积岩叠覆扇所独特的。现代滑坡和碎屑流由于其不规则的上表面,也产生丘状的地貌形态(Jacobi, 1976; Embley, 1980; Prior 等, 1984)。实际上,在现代海洋的滑坡,滑塌和碎屑流比浊积岩更以不规则的上扇表面为特征(Shanmugam, 2000)。

虽然砂质碎屑流沉积是复杂的,但是能够在岩石记录中显示出席状特征,所有碎屑流沉积物都是不连续的观念是不正确的,因为合并的碎屑流沉积能侧向发展(连接到砂体)。碎屑流储层没有好的储层特征,这个传统的观念是不真实的,试验显示砂质碎屑流能沉积仅含微量粘土的砂(少于 1%)。在某些方面,浊流和砂质碎屑流的沉积都是一样的,在许多方面两者又是彼此不同的(Shanmugam, 2000)。

深水沉积的研究似乎进入了一个误区,主要是对沉积过程和沉积流态的认识尚未完全清楚,导致对深水沉积形式和结构模式内充填物的理解存在争论。然而,有意思的是,石油工业的确通过这些扇模式的指引,发现了一个又一个深水油气田,勘探家们

相信这些扇模式是有用的,他们甚至把几乎所有的深水沉积砂岩都称之为浊积砂岩。

3 对深水沉积研究存在问题之理解和前瞻

笔者认为,有三个问题是争论的关键:是否所有深水沉积砂岩都是浊流成因,鲍玛序列能否代表浊积岩相序;是否所有的深水扇水道下方都能形成席状的、平行的、加厚的、具有丘状外形的浊积砂岩沉积;是否可以利用地震方法识别深水扇的砂岩储层。

Bouma 序列可能是一次重力流事件的沉积表现,仅仅是对深水沉积的岩相组合进行描述,并没有观察到沉积的过程,因此,本意并不强调它的沉积过程和属何种流态,只是之后被人们理解为典型的浊流相模式,今天看来 Bouma 序列不是一种流态下形成的,而是包含了多种流态的组合。可能一次重力流事件当中经历了不同沉积流态的有序转换,形成多个沉积岩相组合。

Shanmugam (2000)仅限于对深水沉积沉积范围的研究,通过建立有限的沉积模式研究深水扇,这是远远不够的,解决深水沉积的预测问题应从控制深水沉积的诸多因素入手,如,从考虑深水沉积物的来源、输送渠道和沉积形式,即“源—渠—汇”相互响应的研究思维入手。无论深水扇沉积是何种流态,沉积物源的性质也很重要,同时,无论是作为浊流成因或是作为 Shanmugam 认为的砂质碎屑流成因,石油勘探大量深水油气田的发现证实深水砂岩储层是广泛存在的。因此,如果现今对深水砂岩沉积流态无法认识清楚,作为油气勘探的应用研究,可以先把有储集能力的深水砂岩识别出来。

显然,海底扇模式实际上反映了包含各种重力流事件的堆积,而不仅仅是浊积砂岩,丘形的地震相是由于平静的深海出现了异常的重力流沉积,内部是什么流态还需要进一步识别,而不是形成了模式就都是浊积砂岩了,这就是问题的关键。只要把所有重力流沉积体都称为“扇”,这样通过层序地层格架建立来研究供源—输导—扇体的关系,先把“源—沟—扇”耦合的沉积模式建立起来,在此基础上承认扇内的多种流态沉积,逐步进行研究就有可能识别扇内的储集砂体。

水道前方的叶状体深水席状砂岩虽然很薄,但多个席状砂体叠复就能形成地震反射响应,其实,Shanmugam 认为除了有很多岩心和露头外,深水砂岩的预测工作什么都不能做,过分强调了对微观的

识别,忽略了对宏观的统领。石油工业希望深水扇砂岩是可以预测的,同时,工业需要的是有规模的砂岩,有了相当的规模地震就能识别。对于席状砂岩,地震识别不但体现在分辨率上,而且还能通过连续性反映席状砂岩的成层性,通过振幅反映砂岩与围岩(深海泥岩)的差异,这正是地震所能做到的。

正如 Shanmugam(2000)所述“仅通过选择一个“浊流”的重新定义我们就能使浊积岩样式在 21 世纪继续存在”。其实,Shanmugam 把浊流及其模式狠狠地批判否定后,仅把浊积岩换上砂质碎屑流又开张营业了。

显然,新模式承认深水扇内存在多种流态的沉积,这意味着有多种沉积物类型,也就意味着还需要在模式的基础上进一步把真正的储层识别出来。因此,深水扇模式的建立并不是研究的终结,也没有完成预测的目的,仅是储层识别过程中的一个步骤,深水扇模式建立后要对扇内沉积体进行沉积过程的再现和流态的识别,这样才能识别出有效储层。

总之,深水扇预测需要考虑的主要元素将是:背景源、输送管道、丘状外形、内部结构、沉积过程、沉积流态、席状砂岩、岩石物理属性表现形式及其组合关系等等。

正如 Shanmugam(2000)所言:我们对于深水环境下沉积作用和砂的分布的理解仍很幼稚。我们已经认识到,就海底地形、沉积作用、几何形态和堆积方式而言,深水系统是极其复杂的。我们也认识到没有一个单一的相模式可能解释在复杂的深水环境下的所有变化。深水浊流及其有关的储层在今后至少 25 年内将成为油气勘探与深水沉积研究的前缘(Stow,2000)。

注 释

① 据孙枢 2002 年 5 月 8 日为《中国古代深海沉积和遗迹化石群落》序。

参 考 文 献 / References

张兴阳,罗顺社,何幼斌. 2001. 沉积物重力流深水牵引流沉积组合鲍玛序列多解性探讨. 江汉石油学院学报,23(1):1~5.

Bouma A H. 1983. COMFAN. Geo-Marine Letters,3. 53~224.

Bouma A H., Devries M B, Stone C G. 1997. Reinterpretation of Depositional Processes in a Classiflysch Sequence (Pennsylvanian Jackfork Group), Ouachita Mountains, Arkansasand Oklahoma: Discussion. AAPG Bulletin, 81(3):470~472.

Bouma A H. 1962. Sedimentology of Some Flysch Deposits: a Graphic Approach to Facies Interpretation. Amsterdam: Elsevier.

Dorrik A V. Stow, Mike Mayall. 2000. Deep-water Sedimentary Sys-

tems: New Models for the 21st Century. Marine and Petroleum Geology,17:125~135.

Dott Jr R H. 1963. Dynamics of Subaqueous Gravity Depositional Processes. American Association of Petroleum Geologists Bulletin,47:104~128.

Embley R W. 1980. The Role of Mass Transport in the Distribution and Character of Deep-ocean Sediments with Special Reference to the North Atlantic Marine Geology,38:23~50.

Hampton M A. 1972. The Role of Subaqueous Debris Flows in Generating Turbidity Currents. Journal of Sedimentary Petrology, 42:775~793.

Hampton M A. 1975. Competence of Fine-grained Debris Flows. Journal of Sedimentary Petrology, 45:834~844.

Jacka A D, Beck R H, St Germain L C, Harrison S C. 1968. Permian Deep-sea Fans of the Delaware Mountain Group (Guadalupian), Delaware basin. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Permian Basin Section Publication, 68~11, 49~90.

Jacobi R D. 1976. Sediment Slides on the Northwestern Continental Margin of Africa. Marine Geology,22:157~173.

Kuenen Ph H. 1948. Turbidity Currents of High Density. In Proceedings of 18th International Geological Congress, London. 1950:44~52 Reports pt. 8.

Kuenen Ph H, Migliorini C I. 1950. Turbidity Currents as a Cause of Graded Bedding. Journal of Geology, 58:97~127.

Lowe D R. 1982. Sediment Gravity Flows II-depositional Models with Special Reference to the Deposits of High-density Turbidity Currents. Journal of Sedimentary Petrology, 52:279~297.

Lowe D R. 1979. Sediment Gravity Flows Their Classification and Some Problems of Application to Natural Flows and Deposits. In L. J. Doyle & O. H. Pilkey Geology of Continental Slopes Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication,27:75~82.

Menard H W. 1955. Deep-sea Channels, Topography, and Sedimentation. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 39:236~255.

Middleton G V, Bouma A H. 1973. Turbidites and Deep-water Sedimentation. In Proceedings of Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Pacific Section Short Course. Anaheim, California,pp. 157.

Mutti E. 1977. Distinctive Thin-bedded Turbidite Facies and Related Depositional Environments in the Eocene Hecho Group (southcentral Pyrenees Spain). Sedimentology,24:107~131.

Mutti E, Ricci Lucchi F. 1972. Turbidites of the Northern Apennines: Introduction to Facies Analysis. International Geology Review, 20: 125 ~ 166 (English translation by T H Nilsen 1978).

Mutti E, Ghibaudo G. 1972. Un Esempio di Torbiditi di Coniade Sottomarina Esterina: Le Arenarie di San Salvatore (Formazioni Bobbio Miocene) nell' Appennino di Piacenza Memorie dell' Accademia delle Scienze di Torino, Classe di Scienze Fisiche Matematiche e Naturali,4(16):40.

Mutti E, Tinterri R, Remacha E, Mavilla N, Angella S, Fava L. 1999. An Introduction to the Analysis of Ancient Turbidite Basins from an Outcrop Perspective. AAPG Continuing Education Course Note, Tulsa, OK, Series #39:61.

Normark W R. 1978. Fan Valleys Channels and Depositional Lobes on Modern Submarine Fans Characters for Recognition of Sandy

- Turbidite Environments. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 62: 912~931.
- Normark W R. 1991. Turbidite Elements and the Obsolescence of the Suprafan Concept. *Giornale di Geologia*, ser 3a, 1991, 53/2: 1~10.
- Normark W R. 1970. Growth Patterns of Deep Sea Fans. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 54: 2170~2195.
- Prior D B, Bornhold B D, Johns M W. 1984. Depositional Characteristics of a Submarine Debris Flow. *Journal of Geology*, 92: 707~727.
- Reading H G, Richards M. 1994. Turbidite Systems in Deep-water Basin Margins Classified by Grain Size and Feeder System. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 78: 792~822.
- Sanders J E. 1965. Primary Sedimentary Structures Formed by Turbidity Currents and Related Resedimentation Mechanisms in G V Middleton Primary Sedimentary Structures and Their Hydrodynamic Interpretation. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Special Publication, 12: 192~219.
- Schwab W C, Lee H J, Twichell D C, Locat J, Hans Nelson C, McArthur W C, Kenyon N H. 1996. Sediment Mass-flow Processes on a Depositional Lobe Outer Mississippi Fan. *Journal of Sedimentary Research*, 66: 916~927.
- Shanmugam G, Moiola R J. 1994. An Unconventional Model for the Deep-water Sandstones of the Jackfork Group (Pennsylvanian). Ouachita Mountains Arkansas and Oklahoma Proceedings of Gulf Coast Section of Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Foundation 15th Annual Research Conference Houston (P Weimer A H Bouma & R F Perkins Submarine fans and turbidite systems), 311~326.
- Shanmugam G, Moiola R J. 1985. Submarine Fan Models Problems and Solutions. In Bouma A H, Normark W R & Barnes N E. Submarine fans and related turbidite systems, New York: Springer-Verlag, 29~34.
- Shanmugam G. 1990 In Brown G C, Gorsline D S, & Schweller W J. Deep-marine Facies Models and the Interrelationship of Depositional Components in Time and Space (pp. 199~246), Deep-marine Sedimentation Depositional Models and Case Histories in Hydrocarbon Exploration and Development. San Francisco: Society of Economic Paleontologists and Mineralogists (Society for Sedimentary Geology) Pacific Section.
- Shanmugam G. 2000. 50 Years of the Turbidite Paradigm (1950s~1990s): Deep-water Processes and Facies Models — a Critical Perspective. *Marine and Petroleum Geology*, 17: 285~342.
- Shanmugam G, Moiola R J, McPherson J G, O'Connell S. 1988b. Comparison of Turbidite Facies Associations in Modern Passive-margin Mississippi Fan with ancient active-margin fans. *Sedimentary Geology*, 58: 63~77.
- Shanmugam G. 2002. Ten Turbidite Myths. *Earth-Science Reviews*, 58: 311~341.
- Twichell D C, Schwab W C, Nelson C H, Kenyon N H, Lee H J. 1992. Characteristics of a Sandy Depositional Lobe on the Outer Mississippi Fan from Sea MARC 1A Sidescan Sonar Images. *Geology*, 20: 689~692.
- Vail P R, Audemard F, Bowman S A, Eisner P N, Perez-Cruz C. 1991. The Stratigraphic Signatures of Tectonics Eustasy and Sedimentology — an Overview. In Einsele G, Ricken W. A Seilacher, Cycles and Events in Stratigraphy Berlin (618~659). Springer-Verlag.
- Vail P R. 1987. Seismic-stratigraphy Interpretation Using Sequence Stratigraphy. Pt. 1: Seismic Stratigraphy Interpretation Procedures. In Bally A W, Atlas of seismic stratigraphy. American Association of Petroleum Geologists Studies in Geology, 27: 1~10.
- Walker R G. 1992a. Turbidites and Submarine Fans. In Walke R G, James N P. Facies models: response to sea level change. Geological Association of Canada, 239~263.
- Walker R G. 1978. Deep-water Sandstone Facies and Ancient Submarine Fans: Models for Exploration for Stratigraphic Traps. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 62: 932~966.
- Walker R G. 1992. Facies, Facies Models, and Modern Stratigraphic Concepts. In Walker R G, James N P. Facies Models: Response to Sea Level Change (pp 1~14). Geological Association of Canada.

Frontier of the Deep-water Deposition Study

PANG Xiong¹⁾, CHEN Changmin¹⁾, ZHU Ming¹⁾, HE Min¹⁾, LIU Baojun¹⁾, SHEN Jun¹⁾, LIAN Shiyong¹⁾
1CNOOC Ltd., Shenzhen, Guangzhou, China, 510240

Abstract:

The study and controversy on deep-water deposition have undergone for 50 years. From turbidity currents and Bouma sequence, to the definition of “turbidite” excessively used in the study, and then the denial of Bouma sequence as the turbidite facies sequence and related fan depositional mode, the study on deep-water deposition has undergone circle on cognition. Main problems and controversy focus on those questions such as, Are all deep-water sandstone due to turbidity currents? Can Bouma sequence represent turbidite facies sequence? Were sheet-parallel continuous mounded turbidite sandstone deposits developed at the down-dip direction of deep-water fan channels? Can deep-water fan sandstone be recognized using seismic data? The term “turbidite” excessively used made deep-water sandstone is commonly regarded as origin of turbidity currents in deep-water fan modes, which results in many depositional geologists abandon old

fan models they devoted . At present, deep-water deposition study faces to deny old cognition and establish new concept models.

Petroleum industry made plenty of hydrocarbon discoveries using turbidity currents concept and related models in spite of it face great challenge now, and explorationist want to make more discoveries based on these concept. Therefore, science concept study cannot match with its application.

Recognizing deep-water clastic deposit process、rheology and establishing depositional models are still the critical difficult point that main target is available predication of deepwater sandstone reservoir. At the same time, the scientific problems of deepwater deposition cannot avoid in our country's deepwater hydrocarbon exploration.

Keywords: Deep-water deposition study; Turbidity Current; Bouma Sequence; Sandy debris flows; Deep-water fan mode