

深水沉积层序特点及构成要素

蒋 恕¹, 王 华^{2*}, Paul Weimer¹

1. University of Colorado, Boulder, CO 80309 USA

2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

摘要: 本文在回顾当前国际上深水沉积研究热点的基础上, 结合在墨西哥湾深水研究的成果系统描述了深水沉积的定义、形成机理、深水沉积层序及深水沉积构成要素的特点。深水沉积主要是在重力流作用下深水环境的沉积, 主要形成于相对水平面下降和早期上升的时期, 主要分布在低位体系域中。深水层序以凝缩段为边界, 块状搬运沉积最早形成并直接位于层序界面上, 其上被河道—天然堤沉积所覆盖。典型深水沉积的要素主要由河道、天然堤及越岸沉积、板状砂、块状搬运沉积等构成, 这些沉积要素时空上有序地分布。深水河道是物源的主要通道和沉积的重要场所, 从上游至下游河道弯曲度增加, 能量逐渐减弱。侧向迁移明显, 垂向上由富砂的顺直河道演化为相对富泥的弯曲河道。天然堤及越岸沉积以泥质为主, 天然堤沿河道呈楔状分布, 其近端砂岩含量高, 地层厚且倾角较陡; 远端砂岩含量低, 地层薄且平缓, 侧向连续性好但垂向连续性差。板状砂主要为深水扇前缘非限制性沉积, 可分为块型和层型。块型侧向连续性好, 同时垂向连通性高。层型侧向连续性好, 垂向连通性差。块状搬运沉积主要是低水位期坡上沉积物失稳形成的各类滑塌体及碎屑流, 其对下伏地层侵蚀明显, 分布广泛, 变形构造常见, 可作为油气良好的封盖层。

关键词: 深水沉积; 层序地层; 沉积要素; 河道; 块状砂岩; 块状搬运沉积。

中图分类号: P588.2; P736.2

文章编号: 1000—2383(2008)06—0825—09

收稿日期: 2008—05—26

Sequence Stratigraphy Characteristics and Sedimentary Elements in Deepwater

JIANG Shu¹, WANG Hua^{2*}, PAUL Weimer¹

1. University of Colorado, Boulder, CO 80309, USA

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: This paper mainly presents the definition and forming process of deepwater sediment, as well as the characteristics of deepwater sequence stratigraphy and sedimentary elements. The deepwater sediment is deposited in deepwater environment by the gravity flow, forms during the drop and earlier rise of relative water level, and mainly distributes in lowstand systems tract. The deepwater sequence is bounded by condensed section. Mass transport deposits form the beginning of a sequence formation and sit on the sequence boundary. Then they are overlaid by channel-levee deposits. The typical deepwater sedimentary elements include channel, levee and overbank, sheet sand, and mass transport deposits. These elements are systematically deposited in time and space. Channel is the main sediment conduit and deposition area. From updip to down-dip area, the sinuosity of channel increases and the flow energy decreases. The channel migrates laterally and evolves from lower low sinuous sand-rich to upper high sinuous mud-rich channel. Levee and overbank are dominated by muddy deposits, and levee distributes along the channel and exhibits wedge shape. The proximal levee is characterized by high content of sandstone, thicker deposit and big dip angle, while the distal levee is characterized by low content of sandstone, thinner deposit, small dip angle, good lateral continuity and poor vertical communication. Sheet sand is the distal unconfined deposits of the deepwater fan and can be divided into conglomerate and layered types, and conglomerate sheet sand has a good lateral continuity and vertical communication. The layered sheet sand has a good lateral continuity and poor vertical communication. Mass transport deposits are the slumps, slides and debris flow due to the slope failure during lowstand period. It can erode

基金项目: 挪威国家石油公司(StatoilHydro)基金; 美国石油研究基金; 国家自然科学基金项目(No. 40872077).

作者简介: 蒋恕(1976—), 男, 博士, 主要从事深水石油地质研究. * 通讯作者: 王华, E-mail: wanghua@cug.edu.cn

the underlying strata, and the deformation structure is very common in mass transport deposit, and it can also serve as a good seal for oil and gas.

Key words: deepwater deposit; sequence stratigraphy; sedimentary element; channel; sheet sand; mass transport deposit.

随着当前海底资源的勘探开发,特别是全球深水油气勘探在过去十五年的发展,深水沉积迅速成为研究的热点.当前深水油气勘探是许多油气公司每年上游预算的一个重要组成部分.截至 2003 年,全球 6 个大陆的 18 个深水盆地中发现大约 78BBOE 的总资源,大多深水油气发现集中在墨西哥湾、巴西和西非.其中深水占 85%,超深水占 15%,大部分是 1995 年后发现的.之前,全球深水油气勘探的成功率只有 10%,之后由于墨西哥湾和西非的发现使勘探成功率增加到 30%(Pettingill and Weimer, 2001).当前,随着对深水沉积的深入认识,钻井技术的进步及地震采集处理精度的提高,深水油气勘探和开发的周期逐渐缩短.尽管当前深水油气勘探面临勘探深度、难度、复杂地质、先进技术等挑战,但随着深水油气田发现的比例逐渐提高,深水油气田勘探基础设施以及资金不足的问题会得到解决,深水勘探注定是未来勘探的热点.我国海域深水区域勘探程度极低,具有广阔的勘探前景,同时,深水油气勘探可以促进我国相应海洋工程技术的进步.笔者依据近年来国际深水研究的进展以及自身在沉积及深水领域的研究,探讨深水沉积的层序特点及构成要素,以期促进深水油气地质的研究.

1 深水定义及形成机理

深水有地质和工程两个方面的定义.地质意义的深水指的是深水环境的沉积物,是指在重力搬运作用下沉积在风暴面以下的斜坡至深海平原地带的沉积物.这种重力流沉积也适用于湖泊和克拉通盆地水深超过 300 m 的环境.一般意义的深水指海洋环境中在重力流作用下深水环境的沉积物(Weimer and Slatt, 2006).有些研究者用不同术语描述深水沉积过程及沉积物,例如,浊积体系(Mutti and Normark, 1987, 1991)、浊积体系复合体(Stelling *et al.*, 2000)、海底扇(Bouma *et al.*, 1985).工程上的深水定义指的是现今水深超过 500 m 的水域,该定义主要用于钻井工人描述钻头到达海底前钻柱延续的长度.目前公认为深水定义为 500~2 000 m,超过 2 000 m 的地方为超深水.

相对传统的沉积体系(河流、湖泊、三角洲等)而言,深水沉积体系是很难直接获得、观察和研究的沉积环境.研究深水沉积体系需要许多观测技术,每种观测只能提供一方面的信息,因此,深水体系的研究一直落后于那些易于观察的沉积体系.最早的深水研究来自 Kuenen and Migliorini(1950),他们根据水槽实验以及露头的观察将深水沉积定义为递变层理沉积,并将浊流定义为一种能将沉积物从浅水搬运到深水的一种重要的载体.其间接的证据来自 20 世纪 50 年代东加拿大海域纽芬兰岛海底电缆的周期性中断(Heezen and Ewing, 1952),哥伦比亚海域 Magdalena 扇(Heezen, 1956)以及刚果河及大陆斜坡海底扇(Heezen *et al.*, 1964).海底电缆的中断源于紧贴海底高速浊流的侵蚀.事实上,除了浊流外,很多重力流能将沉积物搬运到深水中.这些重力流主要根据颗粒和流体间作用划分,包括低密度重力流、浊流、液化流.密度越高,颗粒间作用越强.其共性是它们均源于海洋沉积环境,比如,上陆坡的地震产生重力流,此时这种流体称作诱发流体,其受诱导后迅速产生.另外一种称作非诱发流体,或者高密度流,主要源于沉积物和河水的混合物从河口排放到海洋环境.淡水和颗粒的密度不足以使流体沉到高密度的海水底部,因此,流体浮在海面直到颗粒慢慢分散(低密度流体).如果高密度沉积物颗粒到达海域,形成超过海水密度的高密度流体,其会沿海底向坡下运移(Mulder *et al.*, 2003).这些重力流是深水沉积形成的主要机理.

2 深水沉积层序的特点

Bouma(1962)、Mutti and Ricci Lucchi(1972)、Normark(1978)的开拓性工作为早期海底扇研究提供了地质模型. Walker(1978)尝试将这些研究结果合成为一个综合的海底扇沉积模式,主要有供给峡谷、扇根、远端扇等.但随着 2D 和 3D 地震的广泛运用, Walker(1992)放弃了这种模型,认为一种综合的模型不能代表所有的深水沉积.

层序地层主要研究等时地层格架中沉积体的关系.其基础是识别地层界面(区域不整合和其对应的

整合面)以及岩相和沉积环境的关系(Vail *et al.* , 1977). 层序研究包括地震反射资料的解释、露头、岩心、测井及地化等资料的综合运用. 其基本运用包括区域地层对比、识别预测储层、盖层、烃源岩及其时空分布,其预测的沉积模型具有更高的精度. 随着层序地层概念的推广,层序地层已经广泛运用于海相及陆相远景区域及成熟的油气勘探区域,特别是地层油气藏(隐蔽油气藏)的勘探区域(Van Wagoner *et al.* , 1990; Weimer and Posamentier, 1994; 纪友亮,1996,魏魁生,1996;林畅松等,2000;李思田等,2002).

Vail *et al.* (1977)在层序地层研究的基础上首次提出了低位盆底扇具有丘状反射特点,其重复出现在层序界面上. 事实上,许多深水盆底扇并不具备丘状外形,这只是海底扇一种出现形式而已. 不过,这为以后的深水研究提供了基本的概念模式和深水沉积体的识别方法.

第 1 个深水沉积的综合层序地层模型是 Mitchum (1984, 1985) 和 Mutti (1985) 提出的. Mitchum 强调由峡谷供给形成的深水体系组成地震上可以识别的层序,底部由丘状反射相构成,位于层序界面上,常常是海底扇富砂部分. 其上由富泥的河道—天然堤构成. Mutti 深水沉积层序主要源于露头研究,特别是意大利及西班牙前陆盆地的深水沉积. 其强调深水沉积层序中各类相的时空组合关系,并定义了深水沉积的 3 个主要要素: 埕体 (lobe)、河道(channel)及天然堤(levee).

Vail(1987)的层序地层模式(Sea-Slug model)在层序发展中具有里程碑式的意义. 该模型引入了层序的叠加模式及相组合. 将深水不同的沉积体系和海平面变化结合起来. 除了提出一个层序由低

位、海进和高位体系域组成外,还提出了深水沉积主要分布在低位体系域中,是在相对海平面下降及早期上升时期形成的,主要由盆底扇、斜坡扇(主要由河道—天然堤构成)和进积楔构成. 由于近年深水层序研究表明块状搬运沉积(MTD-mass transport deposits)或块状搬运复合体(MTC-mass transport complex)常见于层序底部,因此作者将 MTD 加入改进的 Vail(1987)层序地层模式中(图 1a). 块状搬运沉积主要源于当海平面迅速下降时,陆坡不稳定,坡上沉积物(有时为粗质富砂沉积,常为泥质滑塌体)由于海平面下降大量向海底推进,形成块状搬运沉积,接着盆底扇开始形成.

尽管该模型对层序地层研究具有指导意义,但该模型自产生开始就受到了广泛批评,原因是其来自全球不同盆地的一个简单总结,是极端理想化的结果. 世界上很多深水沉积体系并不像这样,而且该模型没有考虑复杂的物源和构造对深水沉积的控制. Posamentier and Erksine(1991)讨论了非河道供给的沿岸飘砂对深水层序构成的影响;Muntingh and Brown(1993)讨论了不同物源供给体系对深水沉积的影响,他们建议要预测砂质深水体系的出现位置,必须要研究下伏沉积层序的古地理,特别是下伏高位体系域的供给体系对上伏低位体系域具有重要的影响. Reading and Richards(1994)以及 Richards *et al.* (1998)基于粒度和物源供给体系提出了深水体系的综合分类,并类比了露头、现代深水扇以及古代深水扇. 除了物源外,构造对深水沉积体系具有深远的影响,特别是同沉积构造(盐、泥、断裂)对深水沉积更为重要,比如墨西哥湾、尼罗河、巴西、安格拉大陆边缘的盐构造以及尼日利亚、文莱、沙巴、沙劳越等地的泥构造控制了深水沉积的分布及构

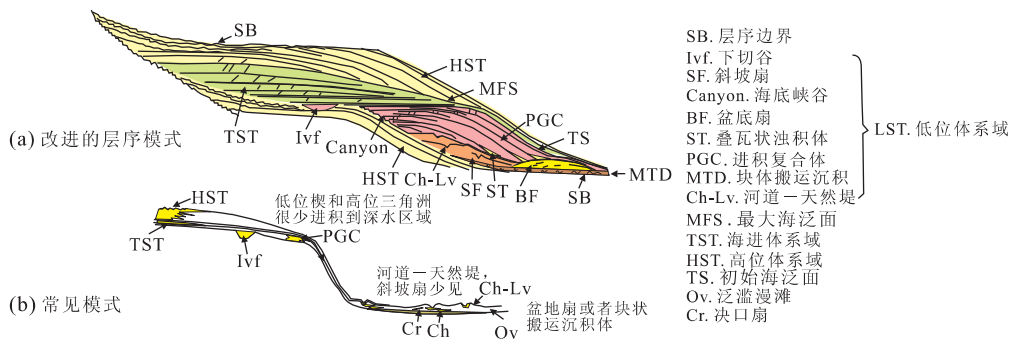


图 1 层序地层模式及深水层序特点(据 Vail, 1987 修改)

Fig. 1 Sequence stratigraphy sea-slug model and its characteristics in deepwater environment

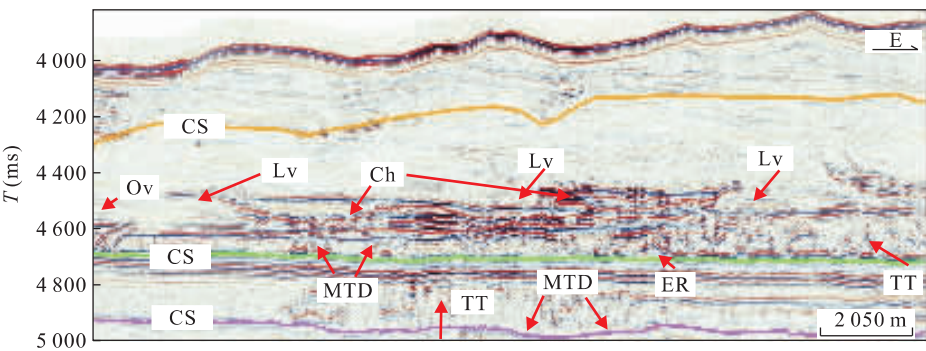


图 2 墨西哥湾西部深水层序地震反射特征

Fig. 2 The deepwater sequence stratigraphy reflection characteristics in western Gulf of Mexico

MTD, 块状搬运沉积; Ch, 河道; Lv, 天然堤; TT, 趾部逆冲(toe thrust); CS, 凝缩段; ER, 侵蚀区域; Ov, 泛滥漫滩

成. Mitchum *et al.* (1993) 提出的同沉积断裂对层序地层构成样式和不同体系域沉积物分布的控制, 特别是深水低位体系域分布在下降盘, 该层序样式是断裂坡折带控砂模式的原型. 盐构造对深水沉积控制的一个典型例子是陆坡内盆地(introslope basin)深水沉积的充填和溢出模式(Prather *et al.*, 1998; Mayall and Stewart, 2000). 盐构造控制了坡内盆地的分布及内部的深水沉积.

深水沉积研究的突破来自三维地震精度的提高, 同时, 水底成像如 GLORIA 侧向扫描声纳促进了深水地层和沉积相的 3D 研究. 随着高精度地震资料的广泛运用(特别是近海底高分辨率地震资料的类比研究), 深水层序特征得到了深入研究. 事实证明其和理想的 Vail 层序地层学有一定的区别, 比

如低位楔和高位三角洲很少进积到深水区(Haughton *et al.*, 2006). 墨西哥湾深水沉积研究表明, 深水层序底部一般为块状搬运沉积(MTD), 有时为盆地扇, 上覆河道—天然堤(channel-leve)、决口扇(crevasse splay)和泛滥漫滩(overbank)沉积(图 1b). 图 2 为墨西哥湾西部典型深水沉积的地震剖面, 其层序是以凝缩段(CS)为界. 这主要由于深水层序以低位体系域为主. 海进体系域和高位体系域在深水区很少沉积, 只有薄层泥质沉积. 该薄层沉积分布广, 有机质丰富, 构成凝缩段, 在地震反射上为一连续的强轴反射. 层序底部块状搬运沉积(MTD)比较常见, 在地震上表现为杂乱反射, 对凝缩段具有侵蚀作用. 块状搬运沉积之上为河道—天然堤沉积, 河道迁移明显. 有时在深水沉积中可见趾部逆冲现

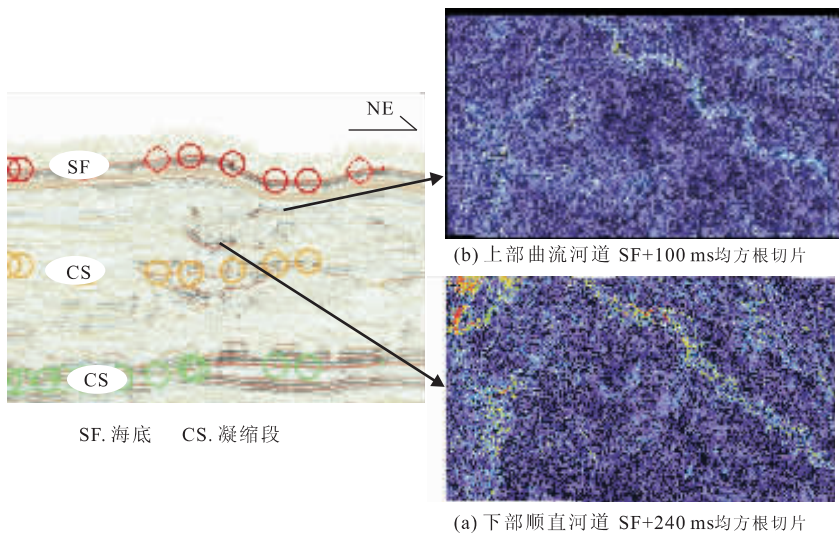


图 3 墨西哥湾西部 RMS 属性深水层序从下至上河道演化特征

Fig. 3 The channel evolution revealed by RMS from bottom to top within a sequence in western Gulf of Mexico

象(图 2),常见于沉积体前方. 这些深水沉积体系的分布具有一定规律性和重复性. 地震属性(例如 RMS—均方根振幅)可以解释沉积地貌特征,是当前深水地震沉积学和地震地貌学研究的重要工具. RMS 属性揭示墨西哥湾西部深水区河道演化具有一定的规律性,从顺直河道演化为曲流河(图 3),表明沉积层序物源供给的能量由强变弱,由富砂沉积向富泥沉积演化,这也反映了相对海平面上升,当河道消失时,凝缩段开始出现.

3 深水沉积要素的构成

前面深水层序地层特点中也提到深水层序的构成要素,例如,河道—天然堤及块状搬运沉积. 深水沉积要素的构成对研究层序构成、演化、预测储集砂体的分布、研究深水沉积的机理以及防止海底钻井事故(如浅层溢流)的发生都具有重要意义. 过去认为深水沉积环境主要由泥质构成,直到 15 年前,砂体搬运通道的发现促进了坡脚大量储层的发现(安哥拉和墨西哥湾等地). 许多斜坡河道有过路沉积标志. 例如,粗质滞留沉积,牵引沉积,异粒沉积的细粒重力尾,细粒天然堤沉积. 德克萨斯二叠系 Brushy canyon 的古地理重建表明,上坡 50% 的砂,下坡 63% 的砂,坡脚 76% 的砂,盆底 93% 的砂(Gardner and Borer, 2000),这主要源于上扇和陆坡主要为供水道和限制性河道充填(confined channel),常常有泥质隔层,而坡脚的盆地主要为非限制性板状砂(sheet sand or lobe). 这些深水沉积要素虽然识别较早,但系统研究较晚. Reading and Richards (1994)系统描述了不同物源供给系统的深水沉积要

素特点,包括楔形体(wedge)、河道(channel)、垛叶体(lobes)、板状砂(sheets)、杂乱丘状沉积(chaotic mounds). Chapin *et al.* (1994)进一步发展了 Shell 公司的概念,研究墨西哥湾深水沉积及油气藏的特征时,强调了 3 种主要的砂体构成要素(板状砂, sheet sand-layered and amalgamated)、河道(channels-single and multistory),以及天然堤中薄层砂(thin beds in levee sediments). 这种描述性分类广泛运用于油气领域. Beaubouef *et al.* (2003)认为深水沉积的主要构成要素包括:峡谷、侵蚀河道、加积天然堤—河道、板状砂或垛状砂. Posamentier and Kolla(2003)、Weimer and Slatt(2006)系统描述了河道(channel)、天然堤—越岸沉积(levee-over-bank)、板状砂(sheet sand)、块状搬运沉积(mass-transport deposits)及混合型(hybrid-type)(包括重新搬运的砂体、白垩浊积体、碳酸盐裙)深水沉积要素. 这些沉积要素在深水沉积中往往有机地联系在一起,每个沉积要素分布在特定的环境中并具有典型的特点. 笔者在参考 Haughton *et al.* (2006)对深水沉积要素研究的基础上,结合墨西哥湾深水沉积特点,总结了典型深水沉积的模式及单个要素分布特征(图 4). 鉴于混合型深水沉积较少见,本文着重介绍常见的前 4 种要素的特点.

3.1 河道

由于墨西哥湾、西非、巴西东部等深水区河道油藏的发现加上三维地震的广泛运用以及预防钻遇河道浅层溢流现象的发生,深水河道受到了极大关注. 河道主要分 3 类:(1)没有天然堤的侵蚀河道;(2)具有加积的天然堤河道;(3)形成于复杂的侵蚀和沉积过程(Mutti and Normark, 1987, 1991; Clark and

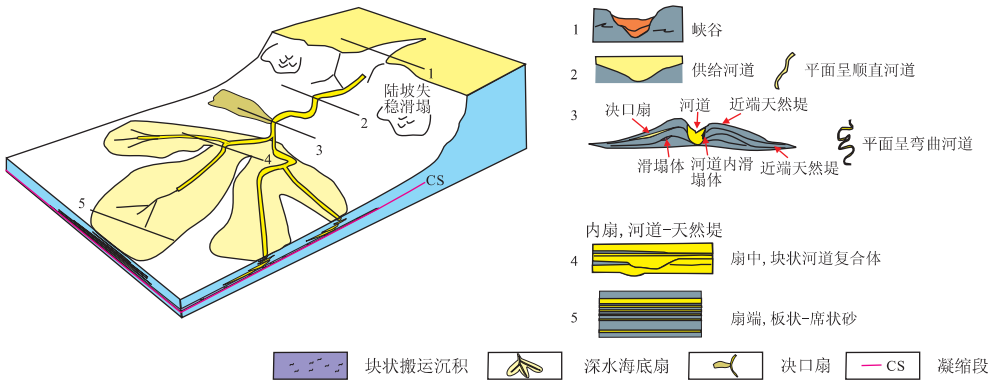


图 4 典型深水沉积模式及各沉积要素特点

Fig. 4 The typical deepwater depositional model and its elements characteristics

Pickering, 1996; Morris and Normark, 2000). 侵蚀河道的充填称作块体河道砂, 加积河道的充填为天然堤河道 (Mayall and O'Byrne, 2002; Saller *et al.*, 2003). 河道在上倾方向地带侵蚀作用强, 主要地形陡导致流速高. 下倾方向, 当地形梯度逐渐变缓时, 河道中侵蚀和沉积作用共存.

河道在地震上为强振幅、中—低频、中—弱连续性 (图 2). 测井曲线为箱状—圣诞树状 (图 5). 河道形状多变, 从上游到下游、从长条状相对顺直的河道到高度弯曲, 河道类型也从长形辫状分流河道到曲流河, 能量逐渐减弱. 除了坡脚下河道类型和形状改变外, 河道内充填的垂向叠加模式也改变, 底部为富砂的侵蚀河道, 接着为混合侵蚀至垂向分布分流河道, 然后为小规模、垂向加积带有天然堤的河道. 河道、天然堤及漫滩在深水沉积中最常见, 构成深水沉积一个有机的相组合体 (图 4, 图 5).

河道内部充填变化很大, 沉积物包括砾石、砂岩、泥岩以及混合充填, 取决于很多因素, 包括构造、气候、沉积物供给 (Reading and Richards, 1994; Richard *et al.*, 1998). 河道充填沉积物包括各种重力流沉积, 如浊积流、碎屑流并夹有深海悬浮沉积物, 有时河道内见滑塌体沉积 (图 4). 粒度一般向上变细.

河道沉积是深水沉积的主要组成部分, 也是最重要的储层. 从陆坡到海底平原过渡带, 由于坡度的变缓, 粗质沉积物迅速从陆坡河道向前方散开, 形成

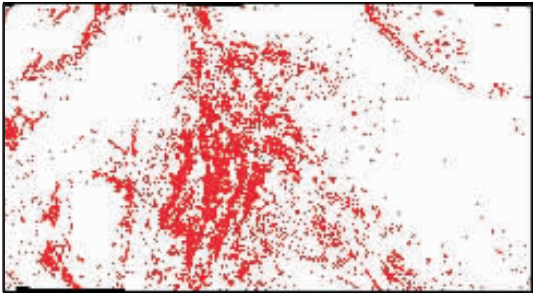


图 6 墨西哥湾西部某海底扇近端复合水道沉积的地震地貌特征 (来自谱分解属性)

Fig. 6 The seismic geomorphology of complex channels of one primal submarine fan in western Gulf of Mexico

类似分流河道的复合河道体, 构成海底扇近端的主要组成部分. 其地震地貌可以清楚地显示海底扇近端复杂河道的特点 (图 6).

3.2 天然堤及越岸沉积

过去二十年, 大多数石油公司主要集中开发河道油藏. 天然堤—越岸沉积主要由泥质和薄层砂岩组成, 其分布临近曲流河道. 天然堤—越岸沉积物沉积亚环境包括近端、远端天然堤、决口扇、滑塌体及沉积坡等, 其平面上沿河道分布 (图 4). 天然堤形成于河道重力流越岸或溢流. 当高速度重力流冲垮河道堤岸时, 由于粗质碎屑不能越过天然堤, 其仍然在河道中被搬运到远端, 而细粒沉积物则越过河岸, 沉积到天然堤环境. 近端天然堤沉积较厚, 因此形成楔状的自然堤, 其厚度从河道边缘向远端逐渐降低. 河道加积的速率低于天然堤的加积, 因此河道顶部是敞开的, 充填从底部向上.

过去人们认为天然堤—越岸沉积基本为泥质沉积物, 最多夹薄层砂岩, 对其作为潜在油气藏了解甚少. 实际上, 天然堤—越岸沉积夹 Bouma 序列的平行层状 (Tb) 和波状 (Tc) 砂岩, 其储层有时候高孔高渗. 薄层天然堤砂岩侧向歼灭以及砂岩和泥岩互层, 其可以作为很好的地层油气藏 (隐蔽油气藏). 井筒成像测井广泛运用于深水环境, 深化了对该类油藏的认识, 传统测井薄层储层表现为低阻、低反差 (泥质) 间隔. 近年来, 随着井筒成像的运用和岩心的分析, 薄层产层逐渐被识别. 但天然堤—越岸沉积油气藏往往开始产量高, 然后迅速衰减, 最后一直维持一个较低的水平.

近期工作揭示了不同河道、近端及远端天然堤的测井曲线识别标志. 其地层倾角可以从地层倾角

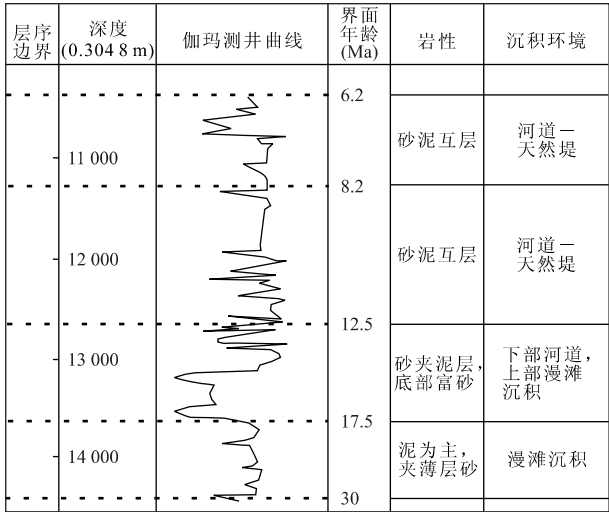


图 5 墨西哥湾密西西比峡谷某井深水沉积测井曲线特征

Fig. 5 The well log characteristics and its sedimentary environment interpretation of one well in Mississippi Canyon, Gulf of Mexico

测井或者井筒成像识别(Browne and Slatt, 2002). 河道充填呈现向上递减的地层倾角. 近端天然堤特点是相对高的砂岩含量, 由于侵蚀面的存在致使垂向和侧向连通性好, 地层方向多变. 远端天然堤及越岸沉积物表现为低砂质含量, 侧向连续性好, 但垂下连通性差, 其地层倾角和方位相对均一. 另外, 决口扇主要分布在曲流河环状河道的顺流端部, 也是潜在的好储层.

3.3 板状砂

板状砂被公认为深水沉积中高产、高采收率的(HRHU)油藏, 主要源于油藏形状简单: 侧向连续性好, 板状外形, 单层砂体内垂向连通性也好, 宽厚比高($>500:1$), 粒度分布窄, 侵蚀特点少. 其呈垛叶状, 部分盆底扇前缘属于板状砂. 板状砂在地震剖面上表现为平行强反射, 侧向连续性好. 其有块型和层型两种. 块型板状砂常处于近端, 特征是砂岩百分含量高, 砂层和砂层接触, 主要由叠加的砂层构成, 夹有少量的泥, 垂向连通性好. 而层型板状砂处于稍远端, 主要体现在相对低的砂岩百分含量, 泥层和砂层互层. 垂向连通性差于块型板状砂. 板状砂在纵向和横向上呈现从块型向层型过渡(Chapin *et al.*, 1994, Weimer and Slatt, 2006). 石油工业界对板状砂研究广泛, 但后来证实很多板状砂不是真实的板状砂而是混合河道砂体.

板状砂沉积于河道端部水流降速的地方, 沉积特点为块状或递变层理, 底部无侵蚀, 反映了沉积物来自其上部的限制性河道, 沉积于非限制环境. 与其他深水储层要素不一样, 板状砂延续范围广, 超过了圈闭范围, 甚至超过小的限制性盆地.

尽管板状砂侧向连续性高, 但是 3 个方面均能增加板状砂储层的复杂性: (1) 砂层被供给水道切割, 一旦水道废弃, 泥质含量增加, 这种隔层会降低连续性; (2) 板状砂外形取决于沉积时的海底地貌; (3) 连续的泥质夹层降低了垂向连通性.

3.4 块状搬运沉积

块状搬运沉积(mass transport deposits 或者 mass transport complex)是由超压引起沉积物再搬运所形成的, 常具丘状外形, 地震相变化较大, 有平行、逆冲、旋转块、杂乱、丘状反射, 连续性差、振幅多变(图 2). 块状搬运沉积包括滑塌、滑坡、块体流、碎屑流、坡身失稳复合体、块体复合体等. 其岩性常以泥质为主, 常常直接位于层序界面上, 对下伏地层侵蚀明显, 其上被河道—天然堤沉积覆盖(Weimer,

1989). 倾角测井、岩心和井底成像证实了沉积物的大量变形(Piper *et al.*, 1997). 尽管块状搬运沉积不是主要的勘探目标, 但其在当今深水沉积中具有举足轻重的作用. 主要原因有: (1) 其是深水沉积重要组成部分, 许多沉积盆地中块状搬运沉积在沉积层序可占 50% 以上(Beaubouef *et al.*, 2003; Newton *et al.*, 2004). (2) 其可成为区域重要的盖层. (3) 控制油气在层序中的分布. (4) 浅层块状搬运沉积容易造成地质工程事故, 延长钻井时间等(Shipp *et al.*, 2004).

4 结语

深水沉积是当今石油工业、海底地震工程等研究的重点. 尽管深水沉积研究具有一定的挑战性, 可喜的是, 多学科多数据(露头、二维、三维地震数据(特别是浅层深水反射地震)、岩心、测井、生物地层、井筒成像测井、地层倾角测井、声纳扫描、测试及生产数据)已经广泛运用于深水研究, 这些资料的综合运用必将推动深水研究. 中国深水研究虽然目前相对国外还处于初级阶段, 但我国陆相层序地层坡折带及隐蔽油气藏勘探理论和南海海底扇研究为深水研究奠定了坚实基础, 随着油气勘探的深入, 相信在我国南海海域、陆相湖泊深水研究将会取得突破. 当然, 由于篇幅有限, 加上深水沉积内容之广, 深水沉积问题很难一篇盖全. 本文旨在抛砖引玉, 不足之处(特别某些深水沉积术语翻译方面)望批评指正.

References

- Beaubouef, R. T., Abreu, V., Van Wagoner, J. C., 2003. Basin 4 of the Brazos-Trinity slope system, western Gulf of Mexico. In: Roberts, H. H., Rosen, N. C., eds., The terminal portion of a late Pleistocene lowstand systems tract. Gulf Coast Section—SEPM, Houston.
- Bouma, A. H., Normark, W. R., Barnes, N. E., 1985. COMFAN: Needs and initial results. In: Bouma, A. H., Normark, W. R., Barnes, N. E., eds., Submarine fans and related turbidite systems. Springer-Verlag, New York, 7—12.
- Bouma, A. H., 1962. Sedimentation of some flysch deposits: A graphical approach to facies interpretation. Elsevier, New York, 168.
- Browne, G. H., Slatt, R. M., 2002. Outcrop and behind-outcrop characterization of a Late Miocene slope fan system, Mt. Messenger Formation, New Zealand. AAPG Bulletin

- tin*, 86(5): 841—862.
- Chapin, M. A., Davies, P., Gibson, J. L., et al., 1994. Reservoir architecture of turbidite sheet sandstones in laterally extensive outcrops, Ross Formation, western Ireland. In: Weimer, P., Bouma, A. H., Perkins, B. F., eds., *Submarine fans and turbidite systems*. Gulf Coast Section—SEPM Foundation 15th Annual Research Conference, 53—68.
- Clark, J. D., Pickering, K. T., 1996. *Submarine channels: Processes and architecture*. Vallis Press, London, 231.
- Gardner, M. H., Borer, J. M., 2000. Submarine channel architecture along a slope to basin profile, Brushy Canyon Formation, West Texas. In: Bouma, A. H., Stone, C. G., eds., *In-grained turbidite systems*. *AAPG Memoir*, 72: 195—214.
- Haughton, P., Chris, D., McCaffrey, W., 2006. Facies prediction in turbidite fan systems—Nature and significance of ‘Linked Debrites’ in sand-rich versus mixed sand-mud systems recent advances in siliciclastic facies models: Implications for reservoir characterization II (SEPM). AAPG Annual Convention, April 9—12, 2006 Technical Program.
- Heezen, B. C., 1956. Corrientes de turbidez del Rio Magdalena. *Boletin de la Sociedad Geografica de Colombia*, 51—52: 135—143.
- Heezen, B. C., Ewing, M. H., 1952. Turbidity currents and submarine slumps, and the 1929 Grand Banks earthquake. *American Journal of Science*, 250: 849—873.
- Heezen, B. C., Menzies, R. J., Schneider, E. D., et al., 1964. Congo submarine canyon. *AAPG Bulletin*, 48: 1126—1149.
- Ji, Y. L., 1996. Sequence stratigraphy in faulted lacustrine basin. Petroleum Industry Press, Beijing, 44—50 (in Chinese).
- Kuenen, P. H., Migliorini, C. I., 1950. Turbidity currents as a cause of graded bedding. *Journal of Geology*, 58: 91—127.
- Li, S. T., Pan, Y. L., Lu, Y. C., et al., 2002. Key technology of prospecting and exploration of subtle traps in lacustrine fault basins: Sequence stratigraphic researches on the basis of high resolution seismic survey. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 27(5): 592—598 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. S., Pan, Y. L., Xiao, J. X., et al., 2000. Structural slope-break zone: Key concept for stratigraphic sequence analysis and petroleum forecasting in fault subsidence basins. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 25(3): 260—266 (in Chinese with English abstract).
- Mayall, M., O’Byrne, C., 2002. Reservoir prediction and development challenges in turbidite slope channels. *OTC Conference Proceedings*, 14029.
- Mayall, M., Stewart, I., 2000. The architecture of turbidite slope channels. In: Weimer, P., Slatt, R. M., Coleman, J. L., eds., *Global deep-water reservoirs*. Gulf Coast Section—SEPM Bob F. Perkins 20th Annual Research Conference, 578—586.
- Mitchum, R. M. Jr., 1984. Seismic stratigraphic recognition criteria for submarine fans. Gulf Coast Section—SEPM Foundation Fifth Annual Research Conference, 63—85.
- Mitchum, R. M. Jr., 1985. Seismic stratigraphic recognition of submarine fans. In: Berg, O. R., Woolverton, D. G., eds., *Seismic stratigraphy II*. *AAPG Memoir*, 39: 117—136.
- Mitchum, R. M. Jr., Sangree, J. B., Vail, P. R., et al., 1993. Recognizing sequences and systems tracts from well logs, seismic data and biostratigraphy: Examples from the late Cenozoic. In: Weimer, P., Posamentier, H. W., eds., *Siliciclastic sequence stratigraphy*. *AAPG Memoir*, 58: 163—199.
- Morris, W. R., Normark, W. R., 2000. Scaling, sedimentologic and geometric criteria for comparing modern and ancient sandy turbidite elements. In: Weimer, P., Slatt, R. M., Coleman, J. L., et al., eds., *Global deep-water reservoirs*. Gulf Coast Section—SEPM Bob F. Perkins 20th Annual Research Conference, 606—628.
- Mulder, T., Syvitski, J. P. M., Migeon, S., et al., 2003. Marine hyperpycnal flows: initiation, behavior and related deposits: A review. *Marine and Petroleum Geology*, 20: 861—882.
- Muntingh, A., Brown, L. F., 1993. Sequence stratigraphy of petroleum plays, post-rift Cretaceous rocks (Lower Aptian to Upper Maestrichtian), Orange basin, western offshore, South Africa. In: Weimer, P., Posamentier, H. W., eds., *Siliciclastic sequence stratigraphy: Recent developments and applications*. *AAPG Memoir*, 58: 71—98.
- Mutti, E., 1985. Turbidite systems and their relation to depositional sequences. In: Zuffa, G. G., ed., *Provenance of arenites*. NATO-ASI series, Reidel, Dordrecht, 65—93.
- Mutti, E., Normark, W. R., 1987. Comparing examples of modern and ancient turbidite systems: Problems and concepts. In: Leggett, J. K., Zuffa, G. G., eds., *Marine clastic sedimentology*. Graham and Trotman, London, 1—38.
- Mutti, E., Normark, W. R., 1991. An integrated approach to the study of turbidite systems. In: Weimer, P., Link, M. H., eds., *Seismic facies and sedimentary processes of submarine fans and turbidite systems*. Springer-Verlag, New York, 7106.

- Mutti, E., Ricci Lucchi, F., 1972. Le torbiditi dell'Appennino settentrionale; Introduzione all'analisi di facies. *Memori della Societa Geologica Italiana*, 11: 161—199.
- Newton, S., Mosher, D., Shipp, C., et al., 2004. Importance of mass transport complexes in the Quaternary development of the Nile fan, Egypt. *OTC Conference Proceedings*, 16742: 10.
- 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.
- Pettingill, H. S., Weimer, P., 2001. World-wide deep water exploration and production: Past, present and future. In: Fillon, R. H., Rossen, N. C., Weimer, P., et al., eds., *Petroleum systems of deep-water basins: Global and gulf of Mexico experience*. Gulf Coast Section—SEPM Special Publication, 1—22.
- Piper, D. J. W., Pirmez, C., Manley, P. L., et al., 1997. Mass transport deposits of the Amazon fan. In: Flood, R. D., Piper, D. J. W., Klaus, A., et al., eds., *Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results*, 155: 109—146.
- Posamentier, H. W., Erskine, R. D., 1991. Seismic expression and recognition criteria of ancient submarine fans. In: Weimer, P., Link, M. H., eds., *Seismic facies and sedimentary processes of submarine fans and turbidite systems*. Springer-Verlag, New York, 197—222.
- Posamentier, H. W., Kolla, V., 2003. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water Settings. *Journal of Sedimentary Research*, 73(3): 367—388.
- Prather, B. E., Booth, J. R., Steffens, G. S., et al., 1998. Classification, lithologic, calibration, and stratigraphic succession of seismic facies of intraslope basins, deep-water Gulf of Mexico. *AAPG Bulletin*, 82(5A): 701—728.
- Reading, H. G., Richards, M., 1994. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system. *AAPG Bulletin*, 78(5): 792—822.
- Richards, M., Bowman, M., Reading, H. G., 1998. Submarine-fan systems I: Characterization and stratigraphic prediction. *Marine and Petroleum Geology*, 15(7): 687—717.
- Saller, A. H., Noah, J. T., Schneider, R., et al., 2003. Lowstand deltas and a basin-floor fan, Pleistocene, offshore east Kalimantan, Indonesia. In: Roberts, H. H., Rosen, N. C., Fillon, R. H., eds., *Gulf Coast Section—SEPM Bob F. Perkins 23rd Annual Research Conference*, 421—440.
- Shipp, C., Nott, J., Newlin, J., 2004. Variations in jetting performance in deepwater environments: Geotechnical characteristics and effects of mass transport complexes. *OTC Conference*, 16751: 11.
- Stelling, C. E., Bouma, A. H., Stone, C. G., 2000. Fine-grained turbidite systems: Overview. In: Bouma, A. H., Stone, C. G., eds., *Fine-grained turbidite systems*. AAPG Memoir 72/SEPM Special Publication, 68: 1—8.
- Vail, P. R., et al., 1977. Seismic stratigraphy and global changes in sea level, Parts 1-11. *AAPG Memoir*, 26: 51—212.
- Vail, P. R., 1987. Seismic stratigraphy interpretation using sequence stratigraphy, Part 1. In: Bally, A. W., ed., *Atlas of seismic stratigraphy*. AAPG Studies in Geology, 27: 1—10.
- Van Wagoner, J. C., Mitchum, R. M., Campion, K. M., et al., 1990. Siliciclastic sequence stratigraphy in well logs, cores, and outcrops. *AAPG Methods in Exploration Series*, 7: 55.
- 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. Turbidites and submarine fans. In: Walker, R. G., James, N. P., eds., *Facies models response to sea level change*. *Geol. Assoc. Can.*, 239—263.
- Wei, K. S., 1996. Non-marine sequence stratigraphy—Case study in Songliao basin. Geological Publishing House, Beijing, 1—114 (in Chinese).
- Weimer, P., 1989. Sequence stratigraphy of the Mississippi fan (Plio-Pleistocene), Gulf of Mexico. *Geo-Marine Letters*, 9: 185—272.
- Weimer, P., Posamentier, H. W., 1994. Siliciclastic sequence stratigraphy—recent developments and its applications. *AAPG Memoir*, 58: 16—18.
- Weimer, P., Slatt, R. M., 2006. Introduction to the petroleum geology of deepwater settings. *AAPG Studies in Geology*, 57: 1—10.

附中文参考文献

- 纪友亮, 1996. 陆相断陷湖盆层序地层学. 北京: 石油工业出版社, 44—50.
- 李思田, 潘元林, 陆永潮, 等, 2002. 断陷湖盆隐蔽油藏预测及勘探的关键技术——高精度地震探测基础上的层序地层学研究. *地球科学——中国地质大学学报*, 27(5): 592—598.
- 林畅松, 潘元林, 肖建新, 等, 2000. “构造坡折带”——断陷盆地层序分析和油气预测的重要概念. *地球科学——中国地质大学学报*, 25(3): 260—266.
- 魏魁生, 1996. 非海相层序地层学——以松辽盆地为例. 北京: 地质出版社, 1—114.