

## 孟加拉湾若开盆地深水沉积体系 结构单元类型及演化模式

马贵明<sup>1,2</sup>, 马宏霞<sup>3</sup>, 邵大力<sup>3</sup>, 范国章<sup>3</sup>, 刘艳红<sup>3</sup>, 丁梁波<sup>3</sup>, 孙辉<sup>3</sup>

(1 中国地质大学(北京); 2 中油勘探开发有限公司; 3 中国石油杭州地质研究院)

**摘要** 利用多个地震数据体的地震反射特征,分析了孟加拉湾若开盆地深水沉积体系的不同沉积结构单元类型(峡谷、水道及水道复合体、天然堤—漫溢沉积、朵体以及块体搬运沉积)的典型地震响应特征、及其发育的位置,构建了研究区陆架—陆坡—盆底的沉积结构单元演化模式。研究表明,一个深水沉积体系垂向上自下而上的组合样式为:底部块体搬运沉积及厚层大规模朵体沉积,上覆水道复合体沉积,之后为水道—天然堤复合体沉积、以及一些小规模朵体沉积,顶部为薄层深海泥岩沉积。横向上自陆架向深海盆地的发育模式表现为:陆架/上陆坡峡谷—上陆坡侵蚀型水道—下陆坡侵蚀沉积型水道—沉积型水道—盆地朵体。

**关键词** 孟加拉扇; 若开盆地; 深水沉积体系; 结构单元; 沉积演化

**中图分类号**: TE121.3

**文献标识码**: A

“深水沉积体系”是指在重力流作用下、沉积于陆坡到盆底部位的沉积结构单元类型及其相关的沉积物<sup>[1]</sup>。深水沉积体系以其规模大、砂岩含量高为显著特征,是深水油气勘探的优质目标<sup>[2-5]</sup>。孟加拉扇是世界上最大的深水沉积体系,南北总长超过3000 km,宽约1000 km,沉积厚度达20 km<sup>[6]</sup>,它的发育始于早始新世,其形成与印度板块向欧亚板块俯冲而导致喜马拉雅山隆起密切相关<sup>[7-9]</sup>。前人对于孟加拉扇的研究主要集中于单个深水沉积结构单元,譬如峡谷<sup>[10]</sup>、水道—天然堤<sup>[11]</sup>、水道复合体<sup>[12]</sup>、块体搬运沉积<sup>[13]</sup>等。由于水体较深以及规模大等原因,难以对孟加拉扇的全貌、以及横向和纵向的演化进行分析。本文主要利用多块位于陆架以及陆坡—盆底的三维地震资料,对深水沉积体系陆架—陆坡—深海盆地的沉积结构样式进行总结分析,并构建其演化模式,以期对深水沉积体系的油气勘探有所启示。

### 1 地质背景

若开盆地位于孟加拉湾东侧边缘的缅甸西部海

域(图1)。该盆地长约850 km,宽约200 km。东侧为印缅蛇绿岩带,北侧为迪桑复理石带、特里普拉—加贾尔褶皱带和吉大港褶皱带,西侧与孟加拉盆地、孟加拉深海扇盆地相接,南部与安达曼—尼科巴—巽他—爪哇前渊盆地相连。若开盆地的形成与古新世以来印度板块与缅甸板块的碰撞、以及增生楔不断向西迁移密切相关。盆地发育巨厚的第三系海洋沉积物。现今陆上第三系沉积地层包括深海、浅海以及三角洲沉积,海上沉积地层包括陆架、陆坡和盆底的深水重力流沉积及原地泥岩沉积。若开盆地的深水沉积为巨大孟加拉扇的一部分,其物源主要来自于喜马拉雅山脉,可能还有少量来自东侧的物源。

### 2 研究方法

研究区(见图1右上角)位于若开盆地的海上区域,由工区 I 和工区 II 两个区域组成(图1);工区 I 现今位于陆架浅水区,绝大部分区域水深小于100 m;工区 II 现今位于深水区,水深基本上大于1000 m。研究区横跨陆架、陆坡及盆底,深水沉积结构单元类型多

收稿日期: 2014-12-18; 改回日期: 2015-09-24

本文受中国石油天然气集团公司科学研究与技术开发项目“海外重点战略大区勘探技术研究与实践”子课题“海外海洋勘探技术与有利目标评价研究”(编号2014D-0908)资助

马贵明: 1970年生,高级工程师,中国地质大学在读博士研究生,主要从事矿产普查与勘探。通讯地址: 100034 北京市西城区阜成门北大街6-1号中油勘探开发有限公司; E-mail: maguiming@cnpcint.com

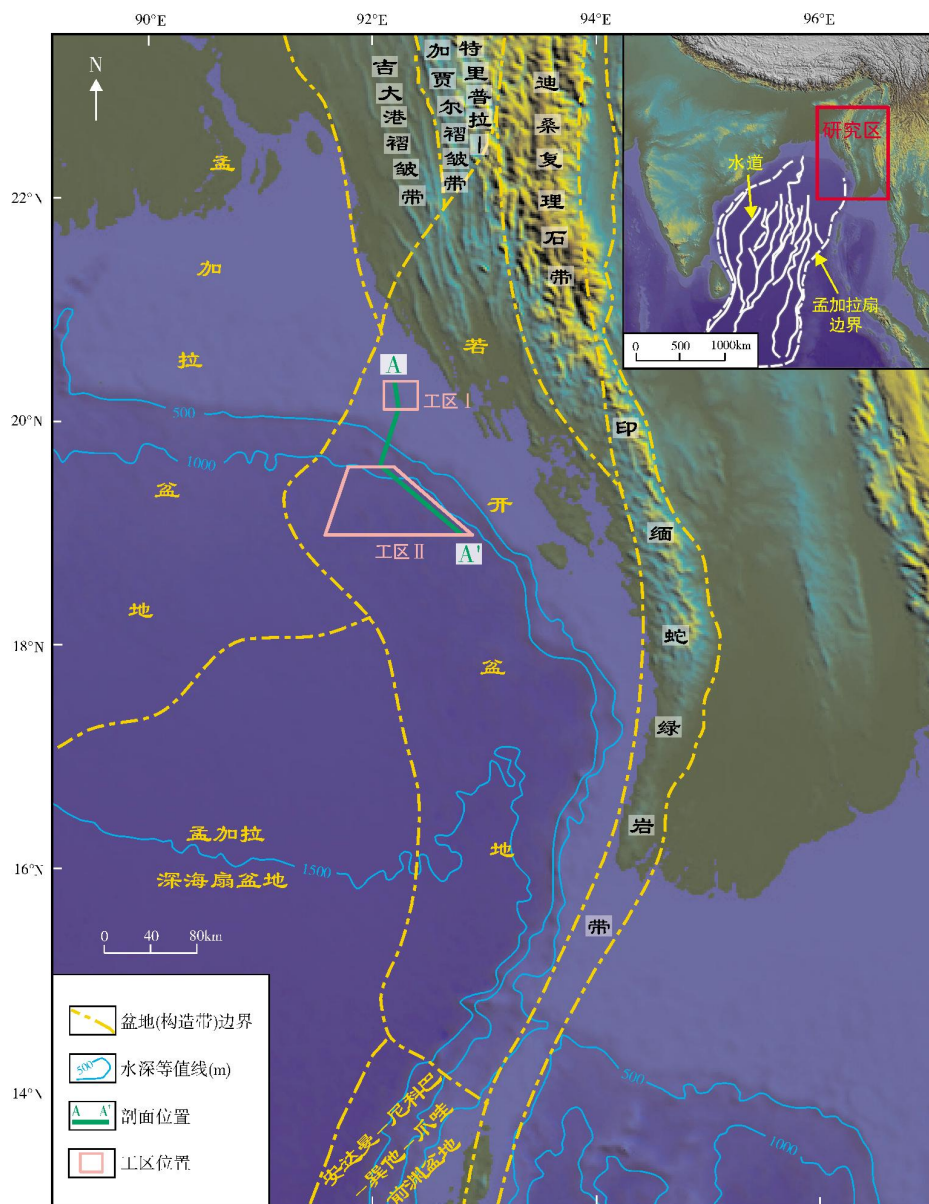


图 1 孟加拉湾若开盆地及研究区地理位置图

样,但由于研究区范围内的地震资料有限,现有资料的范围没有能够完全覆盖陆架—陆坡—盆底的区域,所以,本文主要是利用地震反射特征,对比上新统陆架峡谷及陆坡—盆底的深水沉积结构样式(图 2),分析不同的结构单元类型,并建立从陆架到陆坡以及盆底的深水沉积结构单元发育模式。

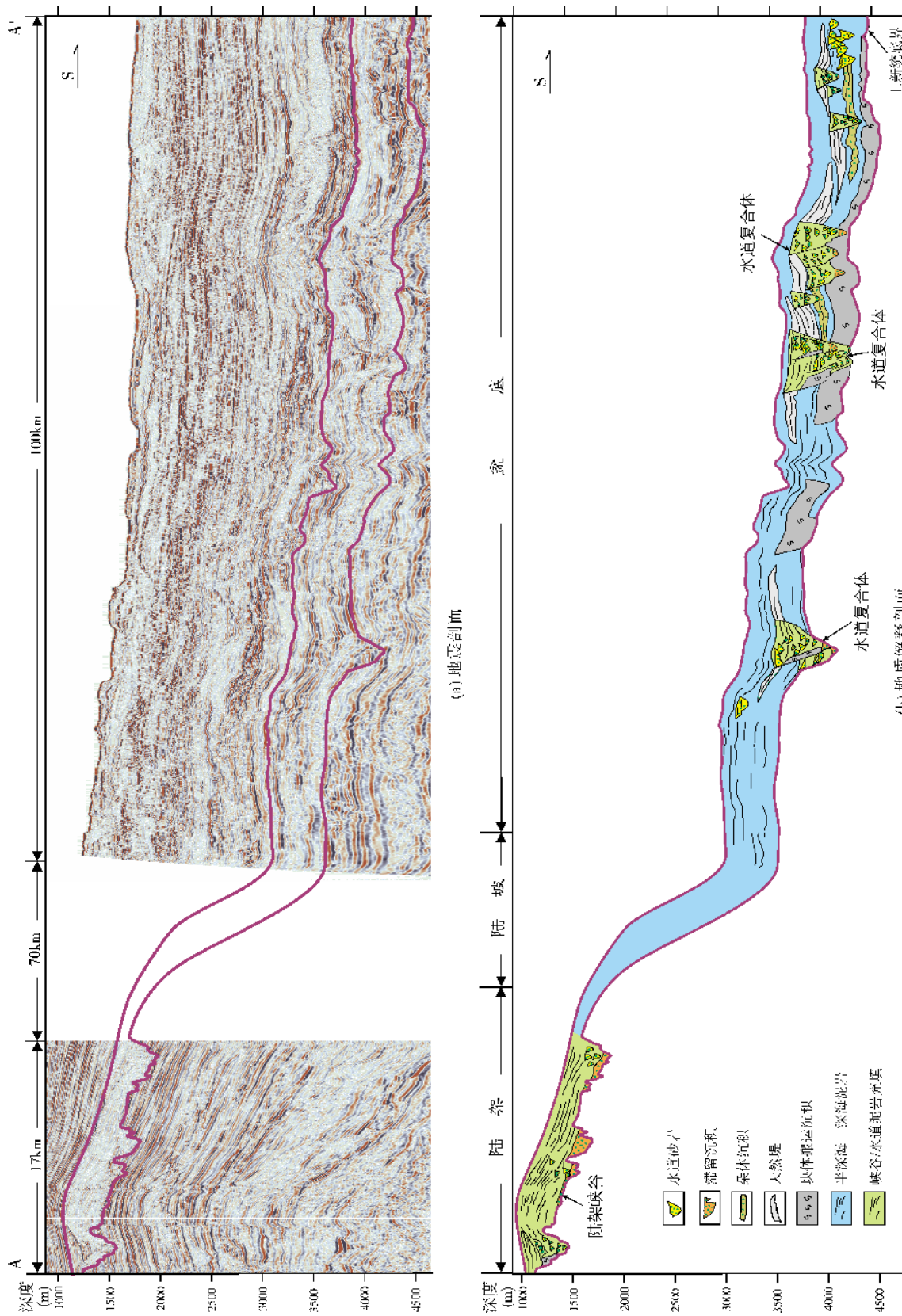
### 3 结构单元类型

研究区共发育五种深水沉积结构单元类型,包括峡谷、水道及水道复合体、天然堤—漫溢沉积、朵

体、以及块体搬运沉积,其沉积位置包括陆架、陆坡以及深海盆底。该深水沉积体系发育时,工区 I 位于陆架位置,发育大型陆架峡谷,并切割三角洲前缘沉积;工区 II 位于下陆坡—深海盆底,主要发育水道及水道复合体、天然堤—漫溢沉积、朵体、以及块体搬运沉积(图 2)。

#### 3.1 陆架峡谷

峡谷是一种典型的海底地貌,对应窄而深的长条负地形。本文所研究的峡谷发育于陆架位置,较顺





直,在研究区内长约26 km,最宽处可达5 km,最大充填沉积厚度近800 m(图3a)。由于地震资料的局限性,难以刻画超出地震工区以外的峡谷规模。峡谷走向近南北向,水流方向自北向南,整个峡谷切割了下伏

陆架三角洲前缘沉积,该陆架三角洲前缘在地震剖面上主要表现为中强振幅、连续反射以及前积反射的特征(图3b),前积反射发育的方向近于自北向南,与峡谷延伸方向基本一致。

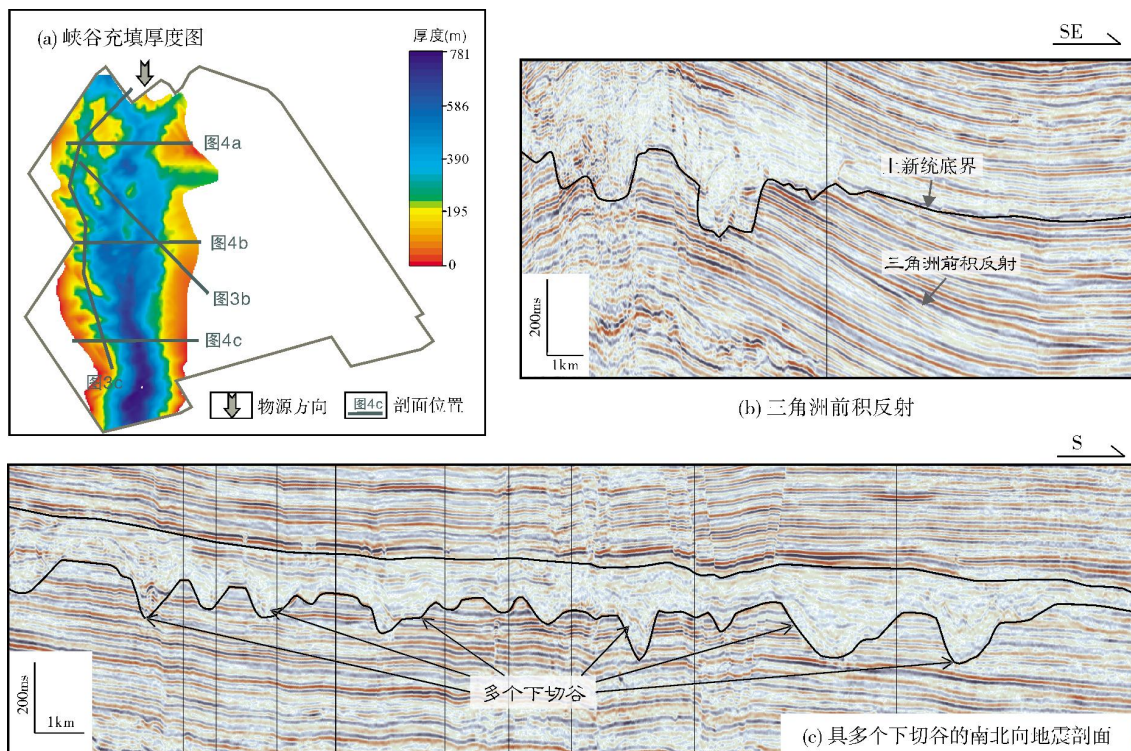


图3 若开盆地工区 I 峡谷充填厚度及地震剖面反射特征  
地震剖面位置见图3a

峡谷发育多条分支下切谷,从剖面特征上来看,这些下切谷分支,宽度大多在1~3 km以内,下切深度大约200~400 m(图3a),其内部充填主要为空白反射—弱振幅不连续反射(图3c)。从其平面特征来看,这些小型的下切谷分支,主要表现为树枝状和放射状,并且峡谷东西两侧具有明显的不对称状,峡谷东部,下切谷分支不发育,而峡谷西侧的下切谷分支则较发育(图3a,3c)。顺着水流方向(向南),峡谷的侵蚀深度及内部地层充填厚度不断增加,峡谷宽度则不断变窄(图3a,图4),这说明峡谷顺着水流方向的侵蚀性不断增强,这种变化可能与水流能量增强和地形坡度变陡有关。

峡谷内部的充填反射特征(见图4)表现为:弱反射为主,夹杂少量短轴强反射。峡谷底部可见强振幅不连续反射,可能为峡谷底部的滞留沉积。上部可见一些具有下切特征、强振幅反射的小规模浊流水道

沉积。从峡谷均方根振幅属性沿层切片(图5)上也可以看出,整个峡谷充填以泥岩沉积为背景,发育小规模弯曲水道(图5a,5b)或顺直水道(图5e)以及小规模朵体(图5a,5c)。这也说明峡谷内部重力流沉积主要表现为沉积过路作用,而小规模的浊流水道或朵体是后期的一些小型浊流活动所形成的。

### 3.2 水道及水道复合体

深水水道为“长条形的负地形,产生和(或)一直保持浊流的特征,并且代表了相对长期的沉积物搬运通道”<sup>[1]</sup>。浊流系统水道的外形和位置受控于沉积过程或者侵蚀下切作用,水道的起伏主要是对原有沉积的侵蚀或者再沉积,或者是两者共同作用的过程所致<sup>[1]</sup>。一次水道下切、充填以及决口或废弃的旋回所形成的是孤立水道,多次水道下切、充填及决口或废弃则形成水道复合体<sup>[14-15]</sup>。

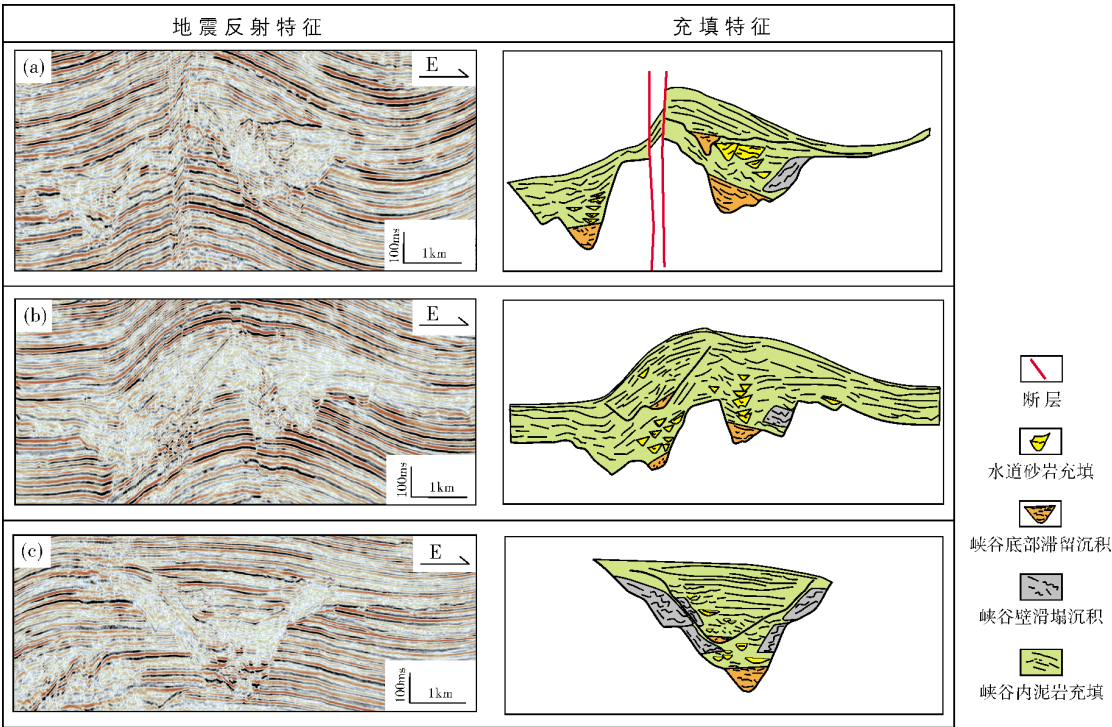


图4 若开盆地峡谷不同部位地震反射特征及充填特征  
剖面位置见图3a

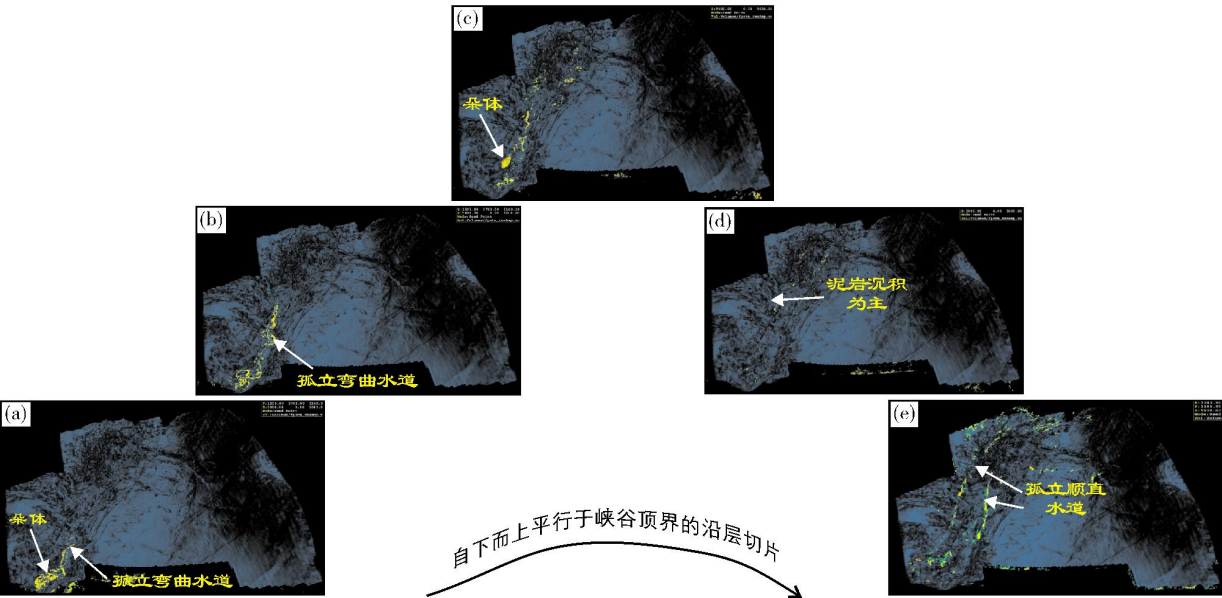


图5 若开盆地陆架峡谷内部充填沉积的均方根振幅属性图

深水沉积体系在研究区主要有五个水道发育带,其中北侧两个(A,B),南侧三个(C,D,E)(图6)。

A为较平直的孤立水道。平面上其弯度约为1~1.2,水道宽度约800m。剖面上外部形态呈“V”型(图

7中的水道A),内部充填为强振幅、平行反射结构地震相(图7a),未见明显侵蚀特征,为一次水道下切、充填及废弃或决口的产物,不发育天然堤—漫溢沉积(图7b中的水道A)。



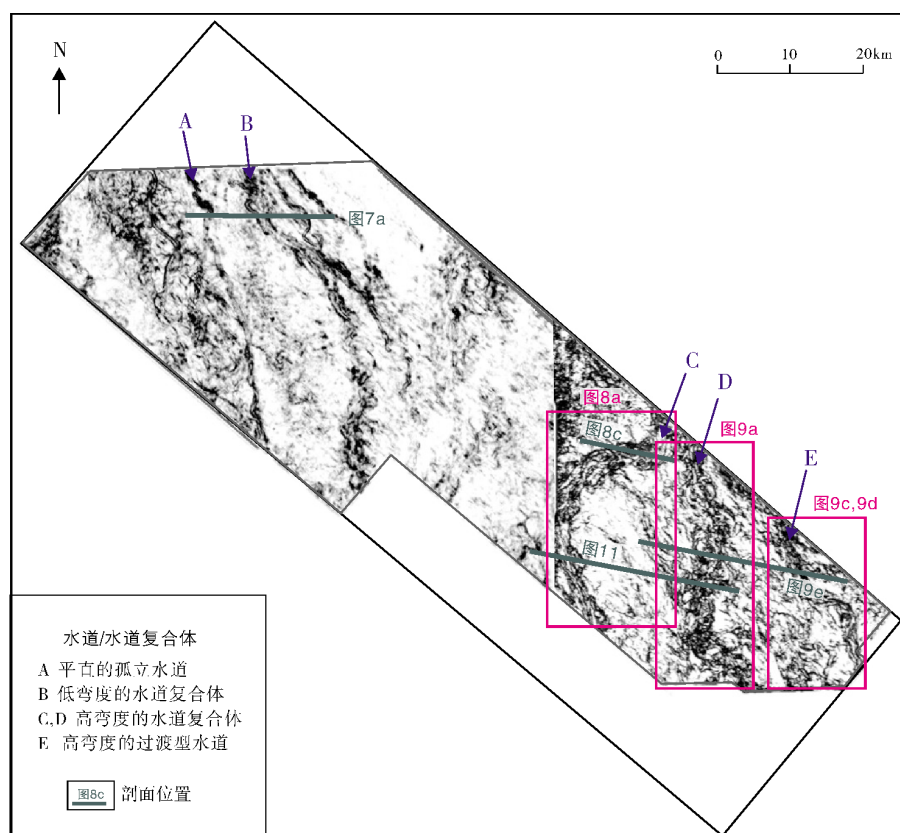


图6 若开盆地工区Ⅱ上新统深水沉积体系相干切片

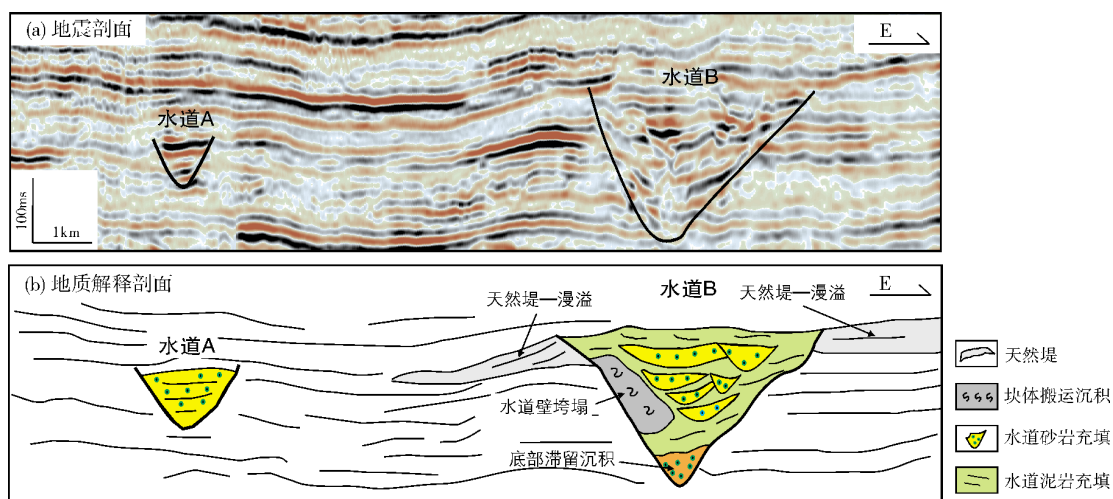


图7 若开盆地水道A及水道B地震剖面及解释

剖面位置见图6

B为低弯度的水道复合体。水道复合体宽度约3 km。剖面上外部形态呈“V”型,内部充填以中强振幅、杂乱反射结构为主(图7a中的水道B)。水道以侵蚀特征为主,只在水道顶部两侧发育小规模天然

堤—漫溢沉积(图7b中的水道B)。

C及D均为高弯度的水道复合体(图8,图9),并切割下伏强振幅连续反射的块体。在平面上,水道表现为“侧向迁移”和“下游扫动”的特征(图8a,8b,

图9a, 9b), 即水道在演化过程中, 由于凹岸侵蚀和凸岸沉积, 不断侧向迁移, 并且在侧向迁移的过程中, 水道也会往下游方向不断迁移。从地震相特征上看 (图8c, 图9e), 水道内部充填特征表现为, 水道底部发育强振幅、杂乱反射特征的滞留沉积; 水道的侧翼则发育杂乱、弱振幅反射, 可能为水道壁滑塌引起的杂乱沉积。由于高频旋回或者自旋回的沉积作用, 水道发生侧向迁移, 在水道迁移方向上原有的堤岸沉

积被新形成的水道所侵蚀, 这样, 仅有相反一侧的堤岸保留下来, 形成了位于水道内部、地震相特征为弱振幅、微弱层状的内侧堤岸沉积 (图8d)。每一个次级水道内部又为一个独立的沉积旋回, 其底部为强振幅的水道底部滞留沉积, 向上变为弱振幅的披覆沉积, 形成了一个从下至上由粗变细的正旋回, 至最终在水道复合体系的末期, 整个水道被充填废弃, 从而构成一个完整的沉积序列。

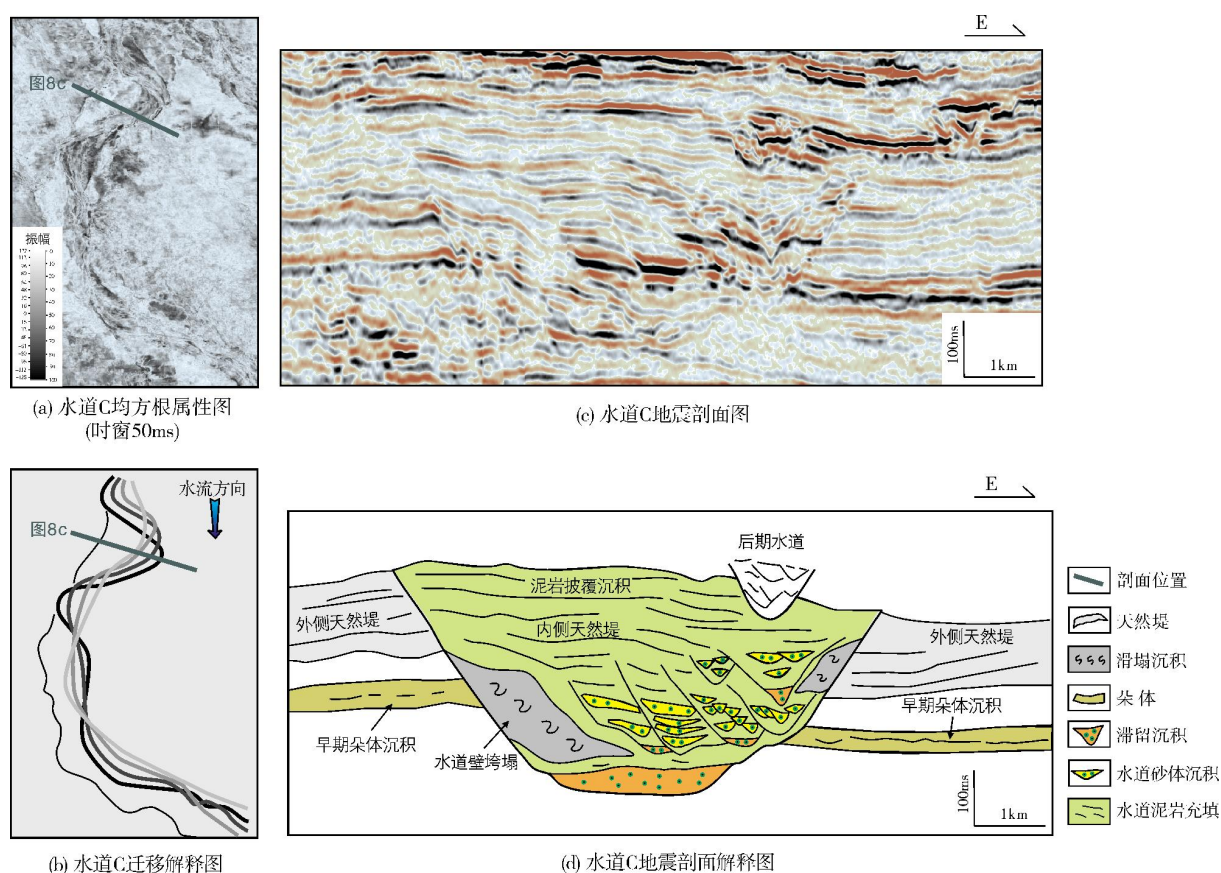


图8 若开盆地水道C平面特征及剖面特征

平面图范围位置见图6, 剖面图位置见图6及图8a

E 为高弯度的过渡型水道, 并切割下伏强振幅、连续反射结构的朵体。在剖面上 (图9e) 可以看出, 水道E既表现出微弱侵蚀下切的特征, 同时又表现出加积的沉积特征, 并且水道E整体表现为强振幅 (图9c, 9e)。

### 3.3 天然堤—漫溢沉积

天然堤—漫溢沉积是重力流溢出堤岸并侧向延伸的细粒沉积。由于重力流漫溢时流速下降很

快, 使得靠近水道的天然堤比远离水道的天然堤沉积更多的沉积物, 形成靠近水道的沉积物较厚、远离水道的则较薄的楔状体 (图7—图9)。在高弯度水道内部, 由于自旋回的沉积作用, 水道发生侧向迁移, 在水道迁移方向上, 原有的堤岸沉积被新形成的水道所侵蚀, 仅有相反一侧的堤岸保留下来, 形成了位于水道内部的弱振幅内侧天然堤沉积 (图8d)。天然堤—漫溢沉积以薄层粉砂岩及黏土沉积为主。



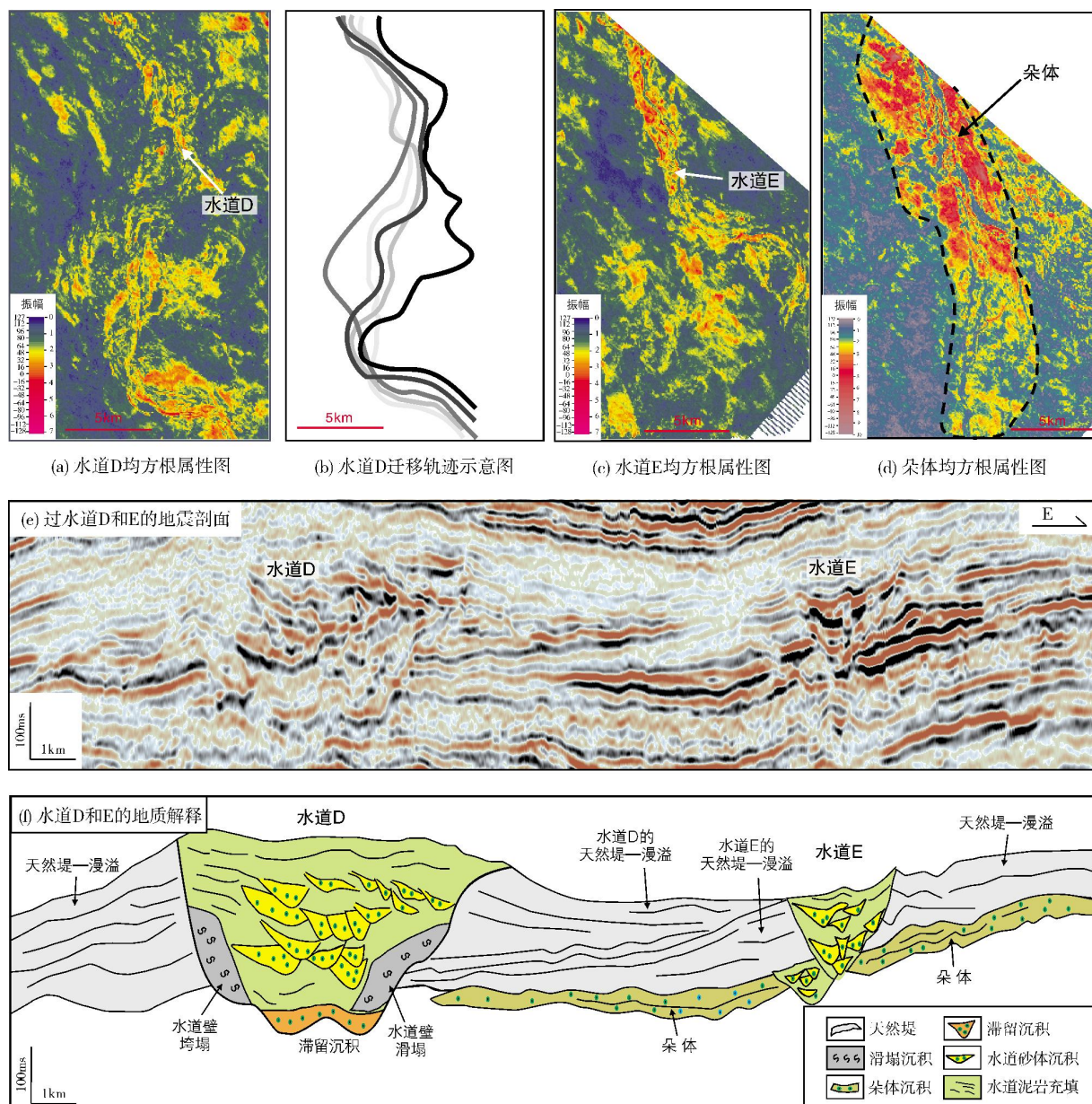


图9 若开盆地水道D及水道E平面特征及剖面特征

平面图范围及剖面图位置见图6

此外,在天然堤可常见一种特征地貌——沉积物波(sedimentary wave),沉积物波是指“水流在海底产生的大规模(一般波长几十米至几千米,波高几米)波状起伏的底形”<sup>[16]</sup>。深水沉积物波主要由沿坡流动的底流(或等深流)、或顺坡流动的浊流形成<sup>[17]</sup>。研究区发现一大型沉积物波(图10),它的波长约2km,涉及的波域面积约2 000 km<sup>2</sup>。该沉积物波垂直于水道,沿陆坡向上迁移,其形成可能与浊流水道相关,

在均方根振幅属性切片上(图10a),该沉积物波表现出强弱振幅间互分布的特征(图10b),具体分析认为,向上陆坡方向的翼部及波峰部分为强振幅反射,推测为富砂沉积,而向下陆坡的翼部及波谷为弱振幅反射,推测为富泥沉积。

### 3.4 朵体沉积

朵体沉积是由于水道末端水流速度降低而沉积



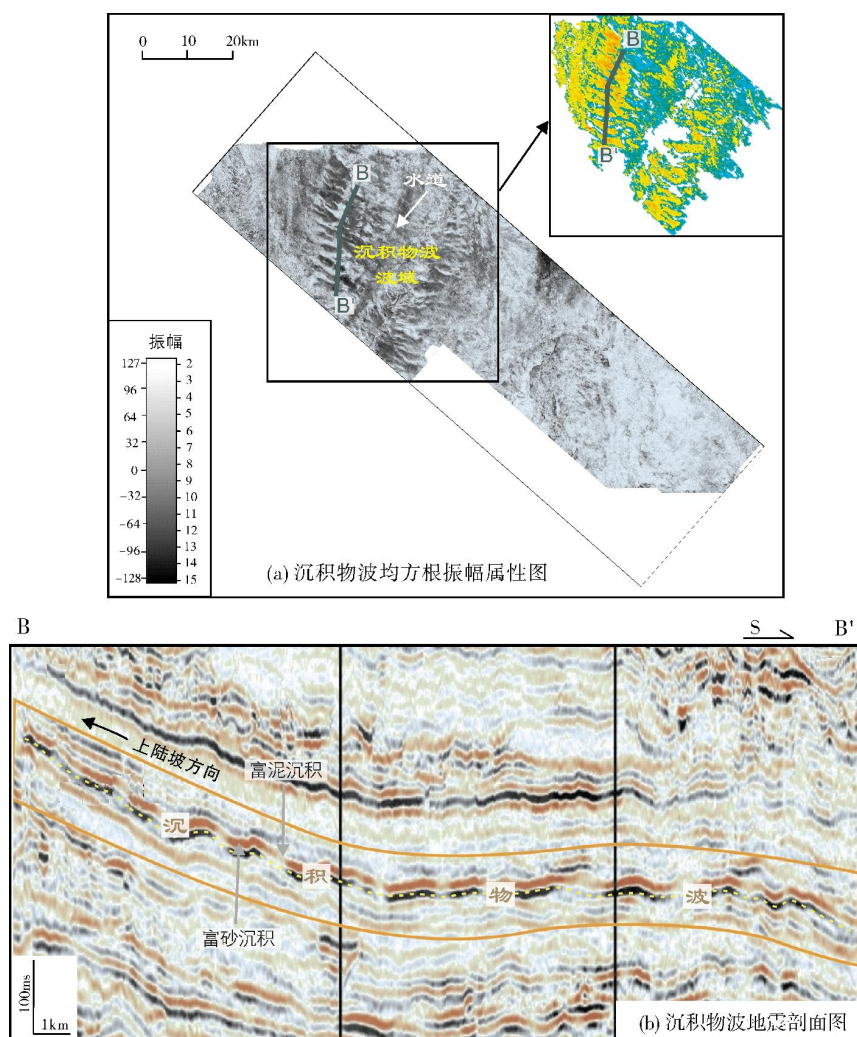


图 10 若开盆地沉积物波形态及地震反射特征

形成的,反映了沉积物经水道(限制性环境)搬运至非限制性环境中沉积下来的结果。在平面上主要表现为朵状、长条状、放射状等<sup>[1]</sup>。图9d中朵体表现为强振幅、连续反射结构的地震响应特征,呈长条状,朵体长度大于24 km,宽约6 km,面积大于130 km<sup>2</sup>。朵体中心部位砂体厚度较大,边缘部位砂体厚度则减薄,直至尖灭。朵体发育于该深水沉积体系形成的早期,并被后期发育的水道(水道E)所切割(图9f)。

### 3.5 块体搬运沉积

块状搬运沉积是深水沉积体系的重要组成部分,它是指除浊积岩之外的各种重力诱使所形成的滑动或滑塌体及碎屑流。块体搬运沉积常常呈弱振幅、杂乱反射结构的特征,总体表现为丘状,与下伏

地层呈侵蚀接触,且侧向尖灭(图11)。块体搬运沉积发育在陆架边缘及陆坡,且可以出现在深水沉积形成过程中的任何时期。

在若开盆地,块体搬运沉积发育于该深水沉积体系的底部,后期被水道切割及朵体覆盖,它的形成可能是由于海平面的下降、沉积物失稳所导致的。

## 4 陆架—陆坡—盆底深水沉积体系演化

根据研究区发育的沉积结构类型,本文总结归纳了深水扇从陆架至陆坡及盆底的深水沉积体系演化模式和垂向演化特征(图12)。

垂向上,一个深水沉积体系的底部为块体搬运沉积及厚层大规模朵体沉积,上覆水道复合体沉积,之后为水道—天然堤复合体沉积、以及一些小规模

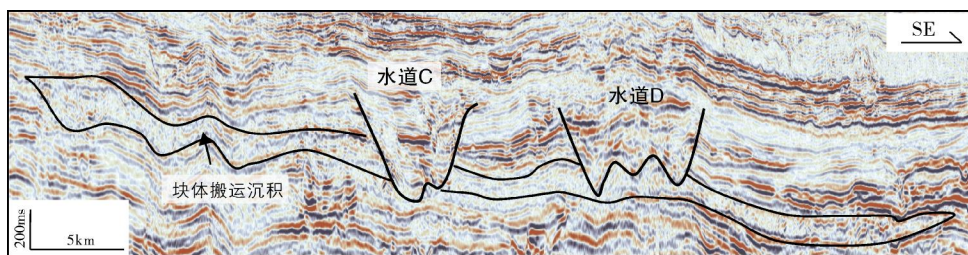


图11 若开盆地深水沉积体系底部块体搬运沉积剖面特征  
剖面位置见图6

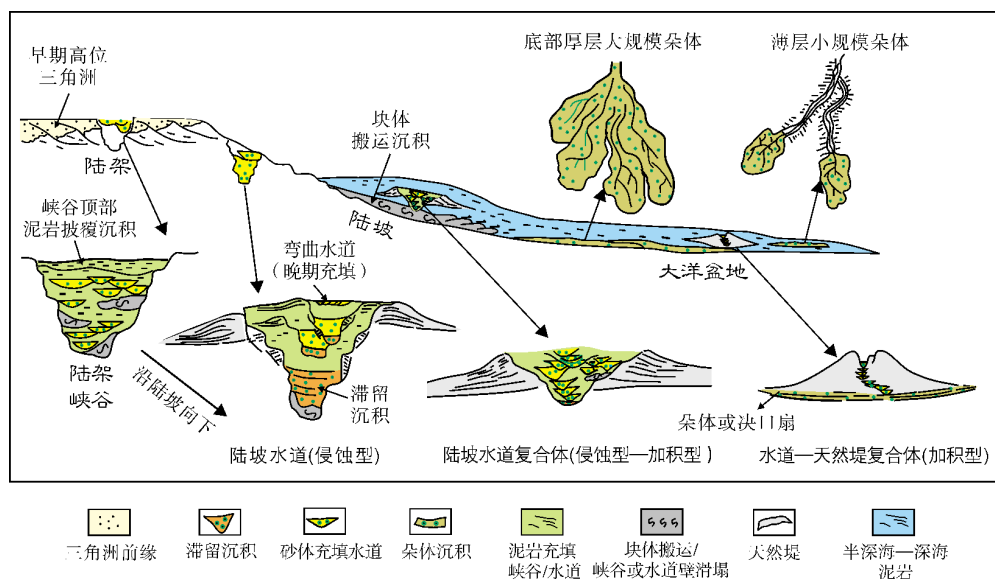


图12 若开盆地研究工区深水沉积体系演化模式

的朵体沉积,顶部为海侵—高位域深海薄层泥岩沉积。一次海平面升降旋回造成了该垂向叠置样式,即相对海平面的下降促使深水扇开始发育,相对海平面的上升(海侵—高位期)导致深水扇发育的结束。

横向上,由于海平面的突然下降,使得陆架边缘环境具有普遍的不稳定性,所以沉积物易在陆架边缘发生滑塌,从而形成负地形,形成峡谷,且峡谷不断向陆架侵蚀,切割早期高位域沉积的陆架三角洲。陆架沉积物以浊流形式经峡谷向陆坡及盆底搬运,峡谷内主要表现为侵蚀过路作用,仅发育一些滞留沉积。上陆坡由于坡度较陡,浊流主要以侵蚀性水道复合体形式向下陆坡方向搬运;至下陆坡,由于地形坡度变缓,水道复合体的侵蚀性减弱,沉积作用加强;至陆坡坡脚处,沉积物发生卸载,粗粒沉积物优先沉积下来,从而形成大规模叠置的朵体。另外,一些能量较强的水道携带沉积物继续向深海流入,但水道规模逐渐变小;至深海平原内部,由于微弱的坡度变化或者局部

洼陷的所处位置,水道可能再次发生分散和沉积物的卸载,形成沉积规模较小的朵体(图12)。

## 5 结论

(1)孟加拉湾若开盆地研究区上新统的深水沉积体系发育五种类型的深水沉积结构单元:峡谷、水道及水道复合体、天然堤—漫溢沉积、朵体以及块体搬运沉积。峡谷发育于陆架,并切割早期三角洲前缘沉积,陆坡及深海盆底主要发育水道及水道复合体、天然堤—漫溢沉积、朵体以及块体搬运沉积。

(2)陆架三角洲前缘及浅海沉积物以浊流形式经陆架峡谷向陆坡—盆底搬运。峡谷内主要表现为侵蚀过路作用,仅发育一些滞留沉积。水道主要发育于陆坡位置,但是一些能量较强的水道也可以发育于深海盆地。水道发育特征与坡度密切相关,上陆坡的坡度较陡,以侵蚀特征为主,下陆坡的坡度变缓,水道的沉积作用增强。陆坡坡脚处由于坡度突然降



低,沉积物发生卸载,可形成大规模叠置的朵体。

(3)在一个完整层序内,自下而上沉积的结构单元组合样式为:底部块体搬运沉积及厚层大规模朵体沉积,上覆水道复合体沉积,之后为水道—天然堤复合体沉积、以及一些小规模朵体沉积,顶部为海侵—高位域深海泥岩沉积,整体表现为一个正旋回的沉积特征。

#### 参考文献

- [1] Weimer P, Slatt R M. Introduction to the Petroleum Geology of Deepwater Settings[M]. AAPG Studies in Geology 57, AAPG/ Datapages Discovery Series 8, 2007: 111-112.
- [2] Shanmugan G. 50 years of the turbidite paradigm(1950s—1990s): Deep-water processes and facies models—a critical perspective [J]. Marine & Petroleum Geology, 2000, 17(2): 285-342.
- [3] Stow D A V, Johansson M. Deep-water massive sands: Nature, origin and hydrocarbon implications[J]. Marine & Petroleum Geology, 2000, 17(2): 145-174.
- [4] Lopez M. Architecture and depositional pattern of the Quaternary deep-sea fan of Amazon[J]. Marine & Petroleum Geology, 2001, 18(4): 479-486.
- [5] 李云, 郑荣才, 高博禹, 等. 深水扇沉积研究现状和展望——以珠江口盆地白云凹陷珠江深水扇系统为例[J]. 地质论评, 2010, 56(4): 549-560.
- [6] Weber M E, Wiedicke-Hombach M, Kudrass H R, et al. Bengal Fan sediment transport activity and response to climate forcing inferred from sediment physical properties[J]. Sedimentary Geology, 2003, 155(3): 361-381.
- [7] Curray J R, Emmel F J, Moore D G. The Bengal Fan: Morphology, geometry, stratigraphy, history and processes[J]. Marine & Petroleum Geology, 2002, 19(10): 1191-1223.
- [8] Kudrass H R, Michels K H, Wiedicke M, et al. Cyclones and tides as feeders of a submarine canyon off Bangladesh [J]. Geology, 1998, 26(8): 715-718.
- [9] Kottke B, Schwenk T, Breitzke M, et al. Acoustic facies and depositional processes in the upper submarine canyon swatch of no ground (Bay of Bengal)[J]. Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography, 2003, 50(5): 979-1001.
- [10] Michels K H, Suckow A, Breitzke M, et al. Sediment transport in the shelf canyon "Swatch of No Ground" (Bay of Bengal)[J]. Deep Sea Research Part II Topical Studies in Oceanography, 2003, 50(5): 1003-1022.
- [11] Hübscher C, Spieß V, Breitzke M, et al. The youngest channel-levee system of the Bengal Fan from digital sediment echosounder data[J]. Marine Geology, 1997, 141(1/4): 125-145.
- [12] 孙辉, 范国章, 吕福亮, 等. 孟加拉湾缅甸若开盆地上新统斜坡水道复合体沉积特征[J]. 沉积学报, 2011, 29(4): 695-703.
- [13] 马宏霞, 吕福亮, 范国章, 等. 缅甸若开海域块体搬运沉积地震响应及典型地质特征[J]. 石油与天然气地质, 2011, 32(5): 751-759.
- [14] Abreu V, Sullivan M, Pirmez C, et al. Lateral accretion packages (LAPs): An important reservoir element in deep water sinuous channels[J]. Marine & Petroleum Geology, 2003, 20(6): 631-648.
- [15] Mayall M, Stewart I. The architecture of turbidite slope channels[C]//Weimer P, Slatt R M, Coleman J, et al. Deep-Water Reservoirs of the World. SEPM, Gulf Coast Section, 20th Annual Research Conference, 2000: 578-586.
- [16] Wynn R B, Stow D A V. Classification and characterisation of deep-water sediment waves[J]. Marine Geology, 2002, 192(1): 7-22.
- [17] 钟广法, 李前裕, 郝沪军, 等. 深水沉积物波及其在南海研究之现状[J]. 地球科学进展, 2007, 22(9): 907-913.

编辑:黄革萍

## Structural Units and Evolution Model of Deepwater Depositional System in Rakhine Basin, Bay of Bengal

Ma Guiming, Ma Hongxia, Shao Dali, Fan Guozhang, Liu Yanhong, Ding Liangbo, Sun Hui

**Abstract:** Structural units of a deepwater depositional system are canyons, channels or channel complexes, levee-overbank, lobes and mass-transport deposits. By means of the seismic reflection data from different areas in Rakhine Basin, Bay of Bengal, the typical seismic response characteristics and developing locations of different structural units are analyzed to establish a evolution model of the deepwater structural units from the shelf through the slope and the basin. It is indicated that a deepwater sediment system evolves upwards from the base as follows: (1) mass-transport deposits and a large-scaled thick lobe at the base, (2) an overlying channel complex at the lower part, (3) a channel-levee complex or a small-scaled lobe in the middle-upper part, and (4) capping thin abyssal sea mudstone at the top. In lateral, the deepwater sediment system is composed of shelf/upper slope canyon, upper slope erosive channel, lower slope erosive-depositional channel, depositional channel and basin-floor lobes from the shelf to the basin.

**Key words:** Deepwater sediment system; Structure unit; Depositional evolution; Bengal Fan; Rakhine Basin

Ma Guiming: Senior Geology Engineer. Doctoral candidate at China University of Geosciences. Add: PetroChina Exploration and Development Co., Ltd., 6-1 Fuchengmen Bei Dajie, Beijing, 100034, China