

文章编号: 1000-0550(2012)01-0084-08

孟加拉扇上扇某区块深水沉积体的特征及演化模式^①

刘曾勤^{1,2} 王英民^{1,2} 吕睿³ 龚承林^{1,2} 陶崇智^{1,2} 黄一洛⁴ 陈玲玲¹ 吴嘉鹏^{1,2}

(1. 中国石油大学资源与信息学院 北京 102249; 2. 油气资源与探测国家重点实验室 中国石油大学 北京 102249;
3. 中国石油化工集团 国际石油勘探开发有限公司 北京 10083; 4. 中国石油大庆油田公司第一采油厂 黑龙江大庆 163112)

摘要 利用高分辨率三维地震资料分析了孟加拉扇上扇某区块的深水沉积体特征。发现了六种典型地震相: 下切充填相、海鸥翼状相、楔形发散相、透明相、强振幅平行相和弱振幅平行相。下切充填相代表粗粒的水道充填沉积; 海鸥翼状相代表水道—天然堤复合体; 楔形发散相代表细粒的天然堤沉积; 透明相代表块体搬运沉积; 强振幅平行相代表朵叶体沉积; 弱振幅平行相代表深海披覆沉积。通过对典型地震剖面特征和平面属性分布分析可知: 上扇垂向上依次沉积了朵叶体、水道和堤岸、朵叶体、水道—天然堤复合体。

关键词 孟加拉扇 深水沉积单元 地震相 演化

第一作者简介 刘曾勤 男 1985年出生 硕士 层序地层学 E-mail: luckhappyboy@163.com

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

近10年全球石油公司在新生代被动陆缘海底扇的勘探活动剧增,如巴西边缘、墨西哥湾和西非陆坡,油气勘探的重点从陆架浅水区转向陆坡深水区^[1]。目前在深水浊积岩和其相关的体系中发现超过了1200个油气田。这些深水碎屑岩体系将是未来油气勘探的主要目标^[1,2]。由于浊积岩体系在石油勘探中的巨大潜力,深水沉积过程及沉积体特征成为了深水研究领域的热点和前沿。国外许多知名学者建立了典型的深水沉积模型,并指出水道充填物和沉积朵体都是潜在的油气储层^[3-9]。

孟加拉扇与亚马逊扇、密西西比扇等一样都是了解沉积过程的良好场所。它们都位于被动大陆边缘,均为细粒、富泥的扇体。总体来说,富泥扇分成上扇,中扇和下扇。在上扇发育大型的水道—天然堤体系,沿着斜坡搬运到中扇形成了更多弯曲的体系,最终在下扇形成了沉积朵体^[6-9]。上扇频繁的决口形成了中扇和下扇大量的水道—天然堤体系的垂向和侧向叠置样式^[10,11]。重力流沿着水道—天然堤体系运动搬运沉积物。在搬运过程中,粗粒的砂体沉积了下来,细粒的物质溢出到堤岸沉积下来。粗粒的物质在水道和终端朵体里沉积,形成了两种最重要的储层^[6]。因此,单个扇体和具体的构型单元的研究可以提高储层预测的准确性^[2,3,7,8]。

孟加拉扇是世界第一大扇,是研究上述问题的天然实验室。但研究区内岩芯和露头稀少,沉积体的刻

画需充分挖掘高分辨率的地震资料的信息^[1]。本文利用研究区的高分辨率三维地震资料来研究孟加拉扇沉积单元的特征,以期建立研究区深水沉积单元的演化模式。

1 地质概况

孟加拉扇覆盖了整个孟加拉湾,北至孟加拉国的大陆斜坡,西至印度东部的大陆斜坡,东至 Sunda 海沟和印缅山脉—安达曼尼科巴山脉之间的 Sunda 俯冲带的增生楔(图1)。孟加拉扇的沉积是从北部的早始新世开始的,扇体从此至今不断向南进积。扇体起始于1400 m水深的20°N,远端边界是水深5000 m处的7°S。扇体的长度达2800 km,宽度介于1430 km(15°N)和830 km(6°N),在陆架坡折附近地层的最大厚度达到了16 km。孟加拉扇覆盖的面积 $2.8 \times 10^6 \sim 3.0 \times 10^6 \text{ km}^2$,沉积物总量达到了 $12.5 \times 10^6 \text{ km}^3$,是名副其实的世界第一大扇^[10,11]。研究区主体位于孟加拉扇上扇区,位于现今 SONG 峡谷右侧(图1a)。目前研究区水深均在1000 m以上,属于陆坡深水区。研究区的地层可以分为典型的四个层序,主要以海相沉积为主(图1b)。

2 孟加拉扇上扇沉积体的典型特征

2.1 上扇地震相类型

研究区内发育了六种典型地震相,分别对应于不

^①国家重点基础研究规划项目(编号:2009CB219407);国家自然科学基金项目(批准号:40572067)资助。
收稿日期:2010-11-05;收修稿日期:2011-01-15

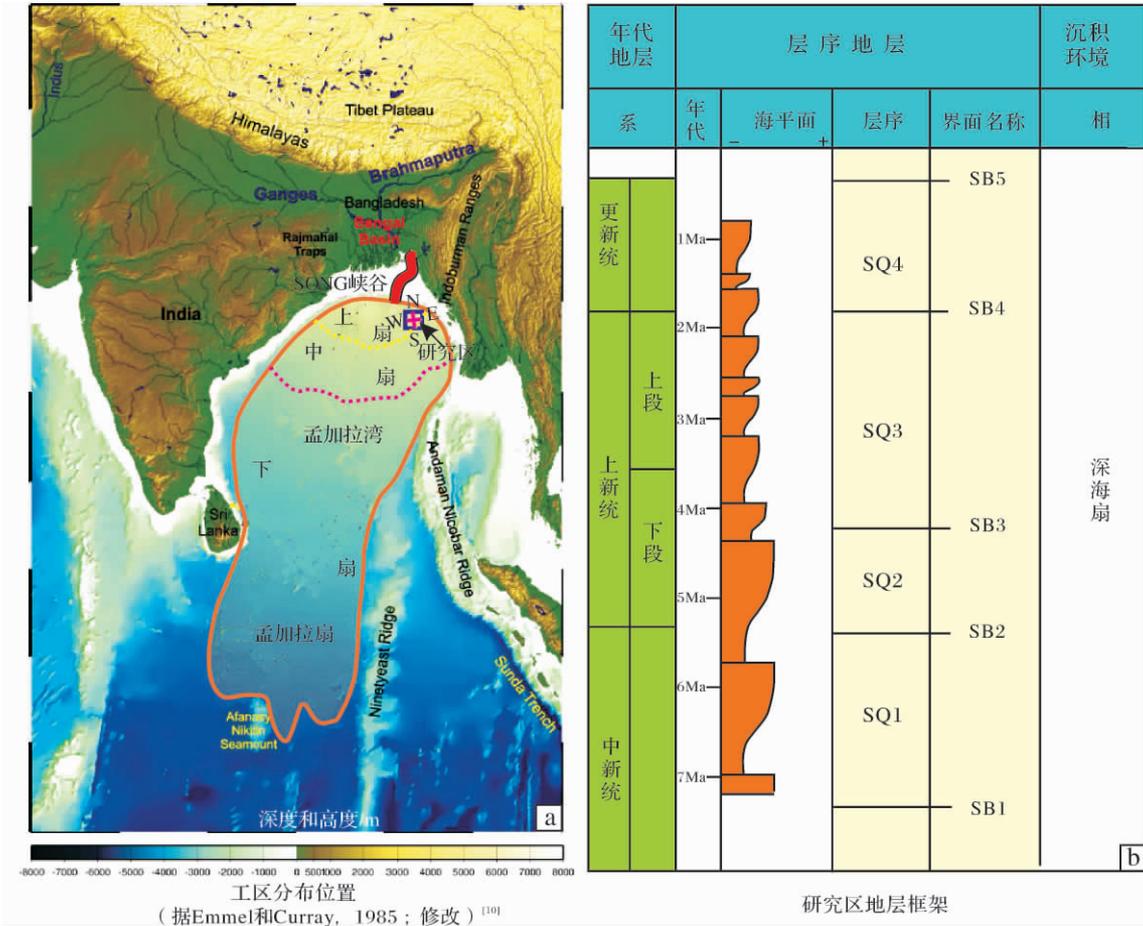


图 1 研究区概况

Fig. 1 Outline of the study area

同深水沉积单元。

(1) 下切充填相(图 2a)呈亚平行状、中—强振幅,反射特征明显。地震剖面上其边缘接触呈 U 或 V 型。此地震相与楔形发散相紧密相连。相带发育的地区一般位于沉降中心。相带的横向宽度变化很大,垂向上厚度高达 400 ms。

水道发育早期,主要表现为侵蚀作用。水道内部的充填物通常为杂乱的强振幅反射,解释为沉积物重力流的滞留性粗粒沉积或者水道壁滑塌体,其中也夹杂有深海泥等细粒沉积物,地震剖面上变现为 U 或 V 型。Hübscher^[14]和 Schwenk^[15]通过对孟加拉扇的声纳和高分辨地震资料分析,认为本地区的下切充填相为水道充填沉积,故将研究区的下切充填相解释为侵蚀水道。

(2) 海鸥翼状相(图 2b)以丘形、强—中振幅反射,中间具有微弱的下切特征,因极像海鸥的翅膀,故称“海鸥翼状相”。

Weimer 定义水道—堤岸复合体为一个地层中所有水道、堤岸和溢岸的集合体^[16]。本文采用 Flood 等的概念,系指一个水道及其对应堤岸的复合体^[17]。加积型水道形成的时候由于沉积物供应充足,堤岸沉积非常发育,使得整个水道—堤岸体系呈丘形或“鸥翼形”,所以本文将海鸥翼状相解释水道—天然堤复合体。

(3) 楔形发散相(图 2c)以倾斜、弱振幅为特征,一般下超在下伏地层上,有时呈波状起伏的特征,通常发育在下切充填相的两翼。地震振幅一般从底部向上变弱,意味着是从粗到细的正旋回序列。下部高密度粗粒浊流和上部低密度细粒浊流的分异沉积造成了堤岸的粒度变化。此类地震相解释为细粒堤岸沉积。

(4) 透明相(图 2d)以弱反射、杂乱为特征,一般处于强振幅平行相的后方。浊流和碎屑流等术语被用来描述块体搬运沉积物和滑块的某些方面的特征。

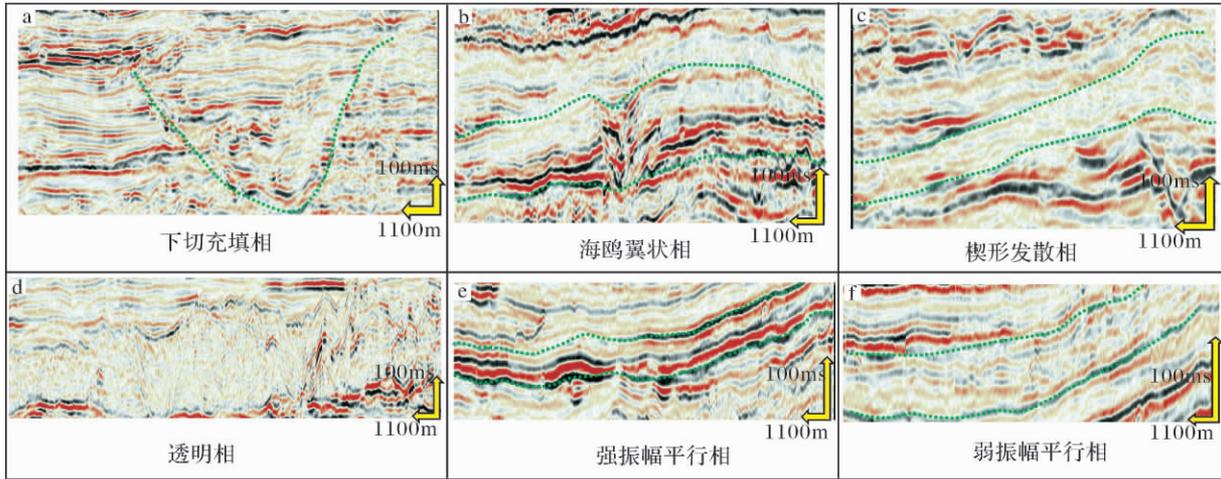


图2 研究区内地震相类型

Fig.2 Seismic facies architectural elements in the study area , upper Bengal Fan

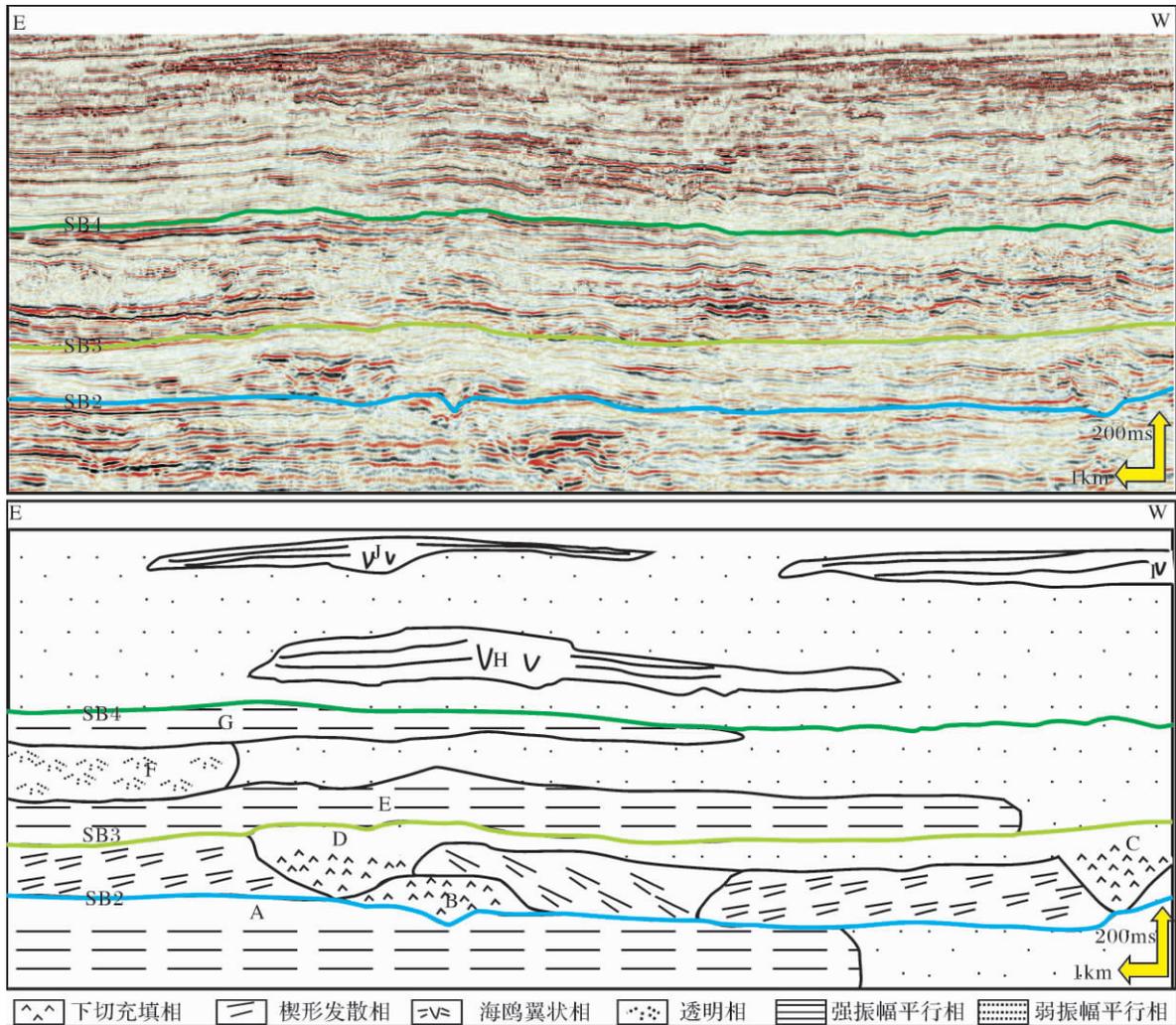


图3 研究区内各沉积单元在 E—W 剖面上的叠置关系

Fig.3 The vertical pattern of sedimentary elements along E—W profile

由于缺少岩芯和钻井数据,对地震所反映出的沉积体避免使用具有过程意义(碎屑流和浊流)的术语,各种类型的滑块(旋转体、滑移体和推覆体)通常是可以接受的术语^[18,19]。块体搬运沉积由滑动、滑塌、碎屑流组成的块体,通常具有强烈的变形,成层性差。在地震剖面上块状搬运沉积呈杂乱、弱振幅反射。透明相能有效地指示块状搬运沉积。

(5) 强振幅平行相(图 2e) 包括了很多平行、强振幅的反射同相轴。这些强振幅一般是与弱振幅平行相共生,甚至在研究区内全部呈强振幅平行状。强振幅平行相解释为朵体沉积,这与 Lopez^[2]、Schwenk^[15]的结论是不一样的。他们的研究区强振幅平行反射一般上超在楔形发散相之上,意味着强振幅相是浊流从堤岸溢出在水道间的低洼处形成的沉积。而本研究区内,强振幅平行相一般与弱振幅平行相共生,意味着是浊流在分支水道末端卸载沉积的产物。

(6) 弱振幅平行相(图 2f) 以弱反射、平行—亚平行状为特征。研究区内该地震相可以与海鸥翼状相、强振幅平行相和楔形发散相共生,在研究区内广

泛分布,成层性好。解释为深海披覆沉积,根据其弱振幅反射推测岩性为页岩。

2.2 沉积单元的垂向分布特征

选取了研究区内南—北和东—西向的两条地震剖面(图 1)进行解释,在此基础上分析研究区内平面上各沉积单元的特征。

(1) E—W 剖面(图 1)

E—W 剖面含有六种地震相:下切充填相、海鸥翼状相、楔形发散相、透明相、强振幅平行相和弱振幅平行相(图 3)。底部单元 A 具有厚达 200 ms 的朵体沉积(强振幅平行相),被上部单元 B 的水道(下切充填相)下切了 10 ms 左右,水道的堤岸沉积不明显,很可能被后期的沉积侵蚀掉了。

剖面单元 C 的水道在下伏的泥质沉积上下切深达 150 ms,堤岸沉积发育。堤岸沉积残留厚度从 100 ms 到 150 ms。因为单元 C 的堤岸受到了后来单元 D 的侵蚀。单元 D 发育水道和堤岸。水道下切在先前的单元 B 上;右侧的堤岸下超在单元 C 的堤岸上,厚度变化范围较大,从 50 ms 到 250 ms;左侧的堤岸厚

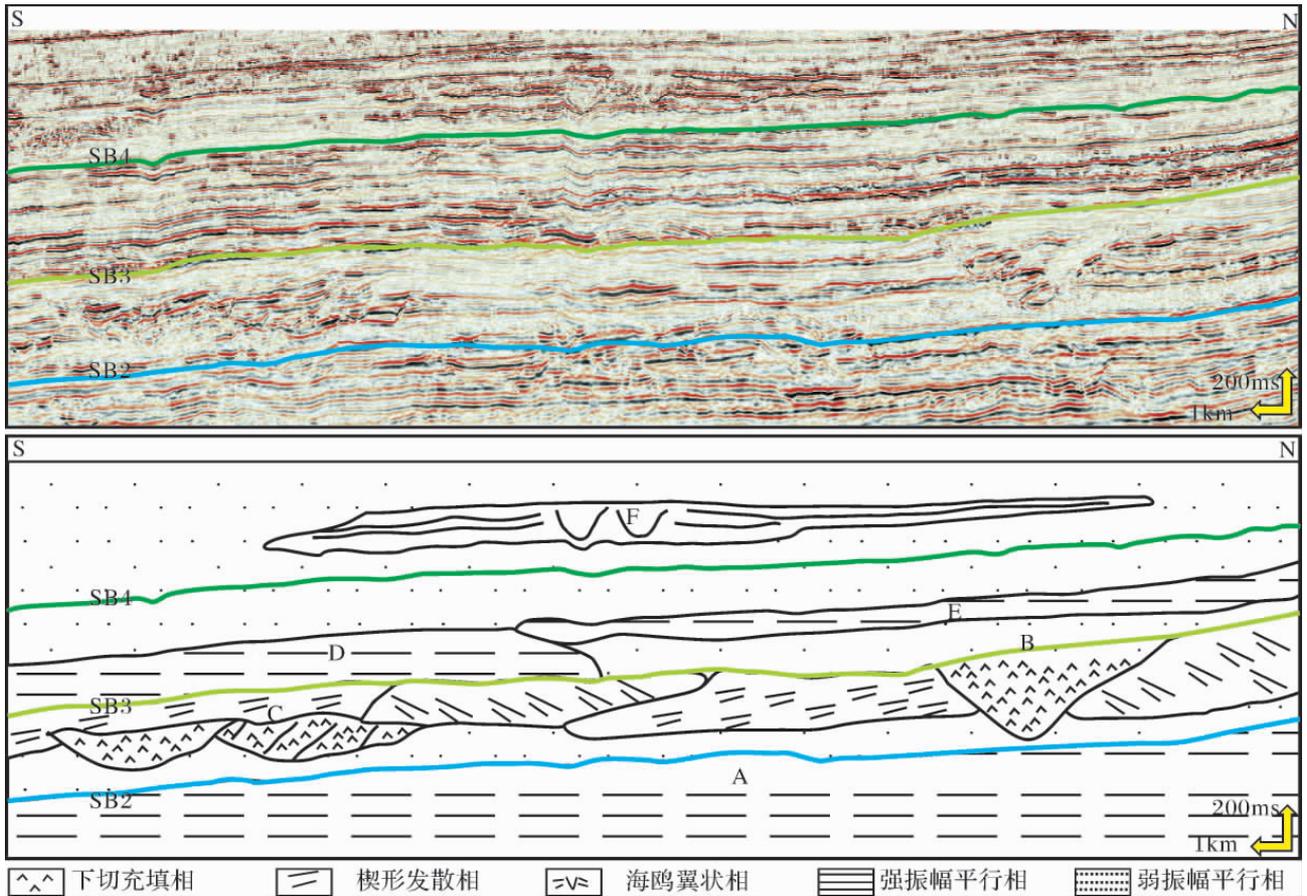


图 4 研究区内各沉积单元在 S—N 剖面上的叠置关系

Fig. 4 The vertical pattern of sedimentary elements along S—N profile

度变化较小,基本在 200 ms 左右。

剖面中间的单元 E 约为 150 ms 的强振幅平行相,推测为朵体沉积。这就意味着单元 E 的沉积相带与下伏地层有了巨大的变化,反映了海平面上升,水道发育位置靠近陆架方向。单元 F 直接覆盖在单元 E 之上,厚度约为 200 ms。单元 F 为块体搬运沉积,侵蚀了下伏的地层,并还存在一些强振幅残留沉积。单元 G 又是一期浊流沉积,水道口卸载形成的朵叶体覆盖在单元 F 之上。单元 G 的厚度较薄,基

本上都在 50 ms 之下。

单元 H 为丘状,推测为水道—堤岸复合体。中间厚度达 150 ms,向两侧逐渐减薄尖灭。沉积体类型又一次发生了重大改变,推测当时海平面可能下降了,浊流长距离运动。位于剖面最上方右侧的单元 I 在研究区内呈单翼状楔形相,推测为另一支在研究区外,故解释为水道—堤岸复合体,平均厚度 100 ms 左右。剖面最上面左侧的体系 J 中央具有微弱的下切特征,两翼逐渐由厚变薄,解释为水道—堤岸复合体。

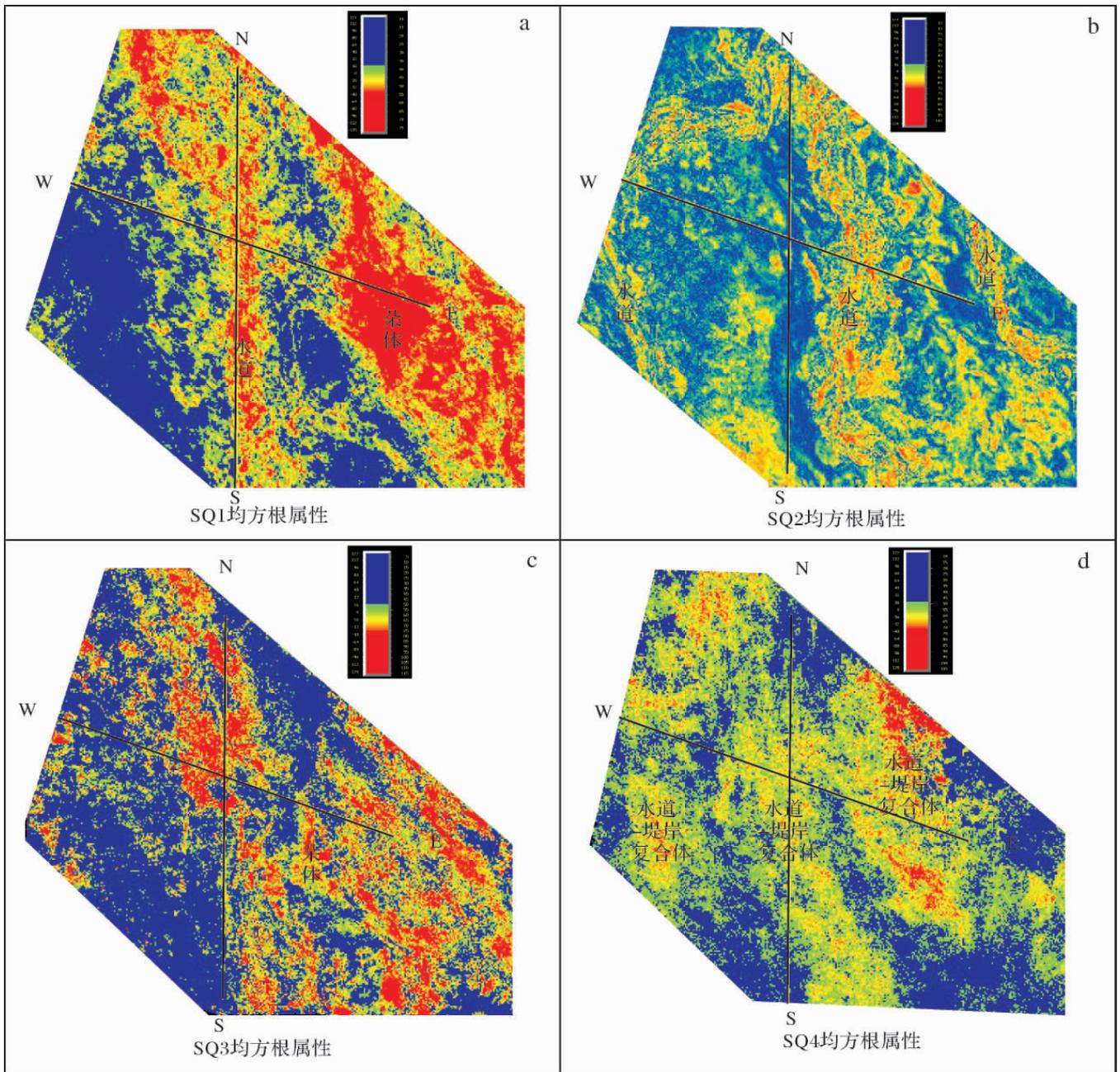


图5 地层的均方根振幅特征

Fig.5 RMS amplitude characteristics of the studied formation

(2) S—N 剖面

S—N 剖面位于研究区内南北方向(图 1), 包括了研究区内五种典型地震相: 下切充填相、海鸥翼状相、楔形发散相、强振幅平行相和弱振幅平行相(图 4)。底部单元 A 具有厚达 200~400 ms 的强振幅平行相, 推测为长期浊流沉积形成的朵叶体。在研究区内分布广泛, 未见到其尖灭。

单元 B 为水道(下切充填相)和堤岸沉积(楔形发散相)。水道的下切能力强, 深达 300 ms, 但未切穿单元 B; 右侧的堤岸延伸到了研究区外, 左侧的堤岸残留厚度平均 200 ms 左右。单元 C 的水道具有多期下切特征, 但整体上下切的深度不大, 约为 100 ms; 左侧和右侧的堤岸沉积交接在一起, 整体厚度较小, 从 50 ms 到 100 ms; 右侧堤岸下超在体系 B 之上。

剖面中间左侧的单元 D 覆盖在单元 C 之上, 厚度变化不大, 250 ms 左右。单元 D 为强振幅平行相的朵体沉积, 与下伏的水道和堤岸沉积存在较大的差别, 同时也印证了 E—W 剖面的推测, 此时海平面处于上升期。右侧的单元 E 下超在单元 D 之上。单元 E 的朵体沉积较薄, 约为 100 ms, 意味着此时浊流发

育的时间较短。

剖面最上面的单元 F 中间具有下切特征, 向两侧沉积厚度减薄, 解释为水道—堤岸复合体。单元 F 与下伏地层沉积相的差异, 也佐证了 E—W 剖面的结论。海平面下降, 陆架暴露, 峡谷中的浊流长距离流动。

2.3 沉积体平面特征

沉积体具有不同的振幅特征: 水道和朵体沉积表现为强振幅特征; 水道—堤岸复合体体现为中—强振幅; 堤岸表现为中—弱振幅。明确沉积体特征之后, 结合均方根振幅属性的平面分布可以确定沉积单元的平面展布特征(图 5): SQ1 研究区主体以朵体沉积为主, 研究区西部发育水道和堤岸(图 5a); 之后 SQ2 发育水道和堤岸体系(图 5b); SQ3 以连续性较差的朵体沉积为主(图 5c); SQ4 发育水道—堤岸复合体(图 5d)。

2.4 研究区内上扇的沉积演化特征

虽然 E—W 剖面(A、B、C、D、E、F、G、H、I、J)和 S—N 剖面沉积体(A、B、C、D、E、F)的沉积样式和发育的期次不同, 但它们都揭示了共同的叠置关系。均

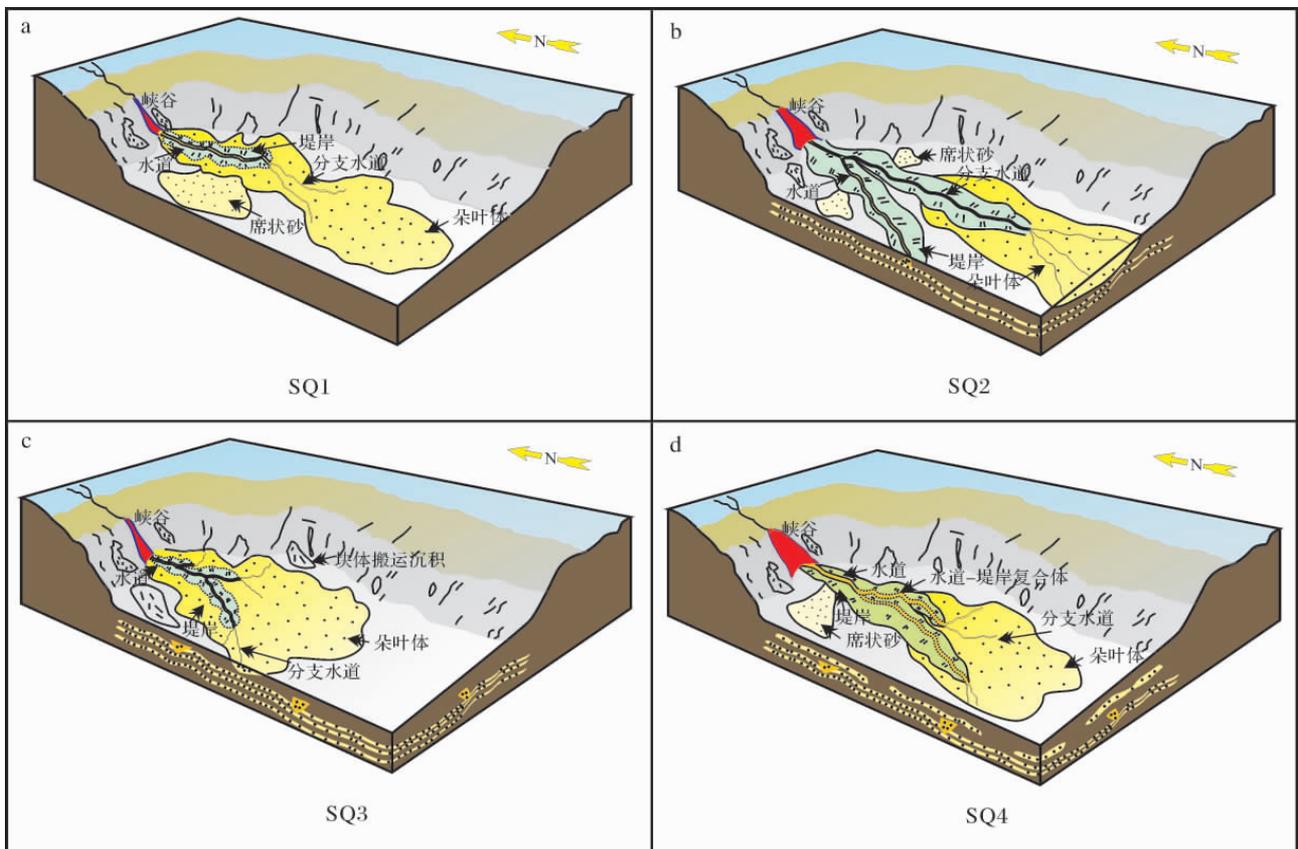


图 6 孟加拉扇上扇沉积演化特征

Fig. 6 The evolution of depositional system in the upper Bengal fan

方根振幅属性的平面分布进一步确定了沉积体的分布规律。SQ1 以强振幅平行相的朵叶沉积为主, 浊流发育时间长, 厚度大(图 6a)。SQ2 以下切充填相的水道和楔形发散相的堤岸沉积为主。水道变化为多期迁移的特征, 从工区的东南向西北方向迁移(图 6b)。SQ3 以强振幅平行相的朵叶体沉积为主, 偶加滑动、滑塌和碎屑流形成的块体搬运沉积(图 6c)。SQ4 以海鸥翼状相的水道—堤岸复合体沉积为主(图 6d)。

3 结论

通过对孟加拉上扇研究区的地震相及沉积体分析, 获得了以下结论:

(1) 基于研究区内的高分辨率地震资料, 在孟加拉扇上扇部位识别了 6 种地震相: 下切充填相、海鸥翼状相、楔形发散相、透明相、强振幅平行相和弱振幅平行相。

(2) 依据地震相结构同时结合深水沉积体特征, 下切充填相为水道充填沉积; 海鸥翼状相为水道—天然堤复合体; 楔形发散相为堤岸; 透明相为块体搬运沉积; 强振幅平行相为朵叶体; 弱振幅平行相为深海披覆沉积。水道和朵叶体的强振幅特征表明岩性是粗粒的砂体, 有可能是良好的油气储层。

(3) 在垂向上, SQ1 以朵叶体沉积为主, 浊流发育时间长, 厚度大。SQ2 以水道和堤岸沉积为主。主要发育两期水道, 从工区的东南向西北方向迁移。SQ3 以朵叶体沉积为主, 偶加滑动、滑塌和碎屑流形成的块体搬运沉积。SQ4 以水道—堤岸复合体沉积为主。

参考文献(References)

- Pettingill H S, Weimer P. Worldwide deep water exploration and production: Past, present and future [J]. *The Leading edge*, 2002, 21(4): 1-22
- Stow D V, Mayall M. Deep-water sedimentary systems: New models for the 21st century [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(1-2): 125-135
- Reading H G, Richards M. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system [J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78(5): 792-822
- Richards M, Bowman M, Reading H G. Submarine-fan systems I: Characterization and stratigraphic prediction [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1998, 15(7): 687-717
- Galloway W E. Siliciclastic slope and base-of-slope depositional systems: component facies, stratigraphic architecture, and classification [J]. *AAPG Bulletin*, 1998, 82(4): 569-595
- Bouma A H. Coarse-grained and fine-grained turbidite systems as end member models: applicability and dangers [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(1-2): 137-143
- Lopez M. Architecture and depositional pattern of the quaternary deep-sea fan of the Amazon [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2001, 18(4): 479-486
- Kolla V, Bourges R, Urruty J M, et al. Evolution of deep-water Tertiary sinuous channels offshore Angola (west Africa) and implications for reservoir architecture [J]. *AAPG Bulletin*, 2001, 85(8): 1373-1405
- Posamentier H W, Kolla V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deepwater settings [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2003, 73(3): 367-388
- Emmel F J, Curray J R. Bengal Fan, Indian Ocean [M] // Bouma A H, Normark W R, Barnes N E, eds. *Submarine Fans and Related Turbidite Systems*. Springer, New York, 1985: 107-112
- Curray J R, Emmel F J, Moore D G. The Bengal Fan: morphology, geometry, stratigraphy, history and processes [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 19(10): 1191-1223
- Curray J R. Sediment volume and mass beneath the bay of Bengal [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1994, 125(1-4): 371-383
- Shanmugam G. 50 years of the turbidite paradigm (1950s-1990s): deep-water processes and facies models—a critical perspective [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2000, 17(1-2): 285-342
- Hübscher C, Spieß V, Monika B, et al. The youngest channel-levee system of the Bengal-Fan: Results from digital echosounder data [J]. *Marine Geology*, 1997, 141(1-4): 125-145
- Schwenk T, Spieß V, Breitzke M, et al. The architecture and evolution of the Middle Bengal Fan in vicinity of the active channel levee system imaged by high-resolution seismic data [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2005, 22(5): 637-656
- Weimer P. Seismic facies, characteristics, and variations in channel evolution, Mississippi Fan (Plio-Pleistocene), Gulf of Mexico [M] // Weimer P, Link M H, eds. *Seismic Facies and Sedimentary Processes of Submarine Fans and Turbidite Systems*. Springer, New York, 1991: 415-434
- Flood R D, Manley P L, Kowsmann R O, et al. Seismic facies and late Quaternary Growth of Amazon Submarine Fan [M] // Weimer P, Link M H, eds. *Seismic Facies and Sedimentary Processes of Submarine Fans and Turbidite Systems*. Springer, New York, 1991: 415-434
- Moscaredelli L, Wood L, Mann P. Mass-transport complexes and associated processes in the off shore area of Trinidad and Venezuela [J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(7): 1059-1088
- Suzanne Bull, Joe Cartwright, Mads Huuse. A review of kinematic indicators from mass-transport complexes using 3D seismic data [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(7): 1132-1151

The Architecture and Evolution of Deepwater Sedimentary Elements in One Study Area within Upper Bengal Fan

LIU Zeng-qin^{1 2} WANG Ying-min^{1 2} LÜ Rui³ GONG Cheng-lin^{1 2} TAO Chong-zhi^{1 2}
HUANG Yi-ming³ CHEN Ling-ling^{1 2} WU Jia-peng^{1 2}

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249;

3. International Corporation of Petroleum Exploration and Development. SINOPEC, Beijing 100083;

4. The First Production Factory, Daqing Oilfield Corporation, PetroChina, Daqing, Heilongjiang 163112)

Abstract: Like Amazon fan and Mississippi fan, Bengal fan is a favorable field for investigating sedimentary process in deepwater. Considering lacking coring and well data, high-resolution 3D seismic data from the study area was analyzed to study the architecture and evolution of sedimentary elements on the upper Bengal Fan. The area of interest belonged to deep-water region, and stratigraphy was formed in marine deposition. Six typical seismic facies have been identified, which were incised channel fill facies, gull wing-shaped facies, wedge-shaped divergent facies, transparent facies, high-amplitude parallel facies and low-amplitude parallel facies. Seismic Facies 1 was interpreted as coarse-grained deposits of abandoned channels. Seismic Facies 2 represented channel-levee complex. Seismic Facies 3 was interpreted as fine-grained levee sediments. Seismic Facies 4 represented mass transport deposits. Seismic Facies 5 was interpreted as lobes, which was different from sheet sand interpreted by predecessors. Seismic Facies 6 represented hemipelagic drapes and fills. On seismic profile lobes and channels display high amplitude, which means coarse lithology deposition, and may be good reservoirs. Through analysis of S-N and E-W seismic profiles reflection characteristics, seismic attribute planeform, we revealed the sedimentary evolution: during the period of SQ1, lobes were deposited, and turbidite flow transported sediments far into basin; main deep-water elements of SQ2 were channels and levees, with channel migrating from SE to NW; Sedimentary elements of SQ3 were lobes, locally MTDs originated from slides, slumps and debris flow; channel-levee complex mainly dominated the stratigraphy of SQ4.

Key words: Bengal fan; deepwater sedimentary elements; seismic facies; vertical pattern