



海底扇规模优质储集体的分布模式与成因分析

龚承林, 朱一杰, 邵大力, 郭荣涛, 戈道瑶, 丁梁波, 齐昆, 马红霞

引用本文:

龚承林, 朱一杰, 邵大力, 郭荣涛, 戈道瑶, 丁梁波, 齐昆, 马红霞. 海底扇规模优质储集体的分布模式与成因分析[J]. 沉积学报, 2023, 41(1): 1-17.

GONG ChengLin, ZHU YiJie, SHAO DaLi, GUO RongTao, GE DaoYao, DING LiangBo, QI Kun, MA HongXia. Distribution Patterns and Genetic Analyses of Potentially Productivegood Deep-water Reservoirs: A case study from the Pliocene-Pleistocene Bengal Fan[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(1): 1-17.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

新西兰深水Taranaki盆地中新统深水水道迁移及沉积演化

Migration and Sedimentary Evolution of the Miocene Deep-water Channel in the Deep-water Taranaki Basin, New Zealand

沉积学报. 2023, 41(1): 85-96 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.040>

下刚果盆地中新统重力流沉积演化及控制因素

Sedimentary Evolution and Controlling Factors of Miocene Gravity Flow Deposits in the Lower Congo Basin

沉积学报. 2023, 41(1): 73-84 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2022.032>

深水浊流沉积综述

An Overview of Deep-water Turbidite Deposition

沉积学报. 2019, 37(5): 877-903 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.049>

辽中凹陷北洼古近系东二下亚段湖底扇沉积类型及时空演化机理分析

Sedimentary Types and Genetic Mechanism of the Space-time Evolution of Sublacustrine Fans of the Paleogene in Lower Ed2 Formation, Northern Sub-sag of the Liaozhong Sag

沉积学报. 2019, 37(6): 1280-1295 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.007>

琼东南盆地中央峡谷西段莺歌海组沉积演化及储层预测

Evolution and Reservoir Prediction of Yinggehai Formation in western Central Canyon in Qiongdongnan Basin

沉积学报. 2015, 33(4): 809-816 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.04.019>

文章编号:1000-0550(2023)01-0001-17

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2021.151

海底扇规模优质储集体的分布模式与成因分析 ——以上新世—更新世孟加拉扇为例

龚承林^{1,2}, 朱一杰², 邵大力³, 郭荣涛⁴, 戈道遥², 丁梁波³, 齐昆², 马红霞³

1. 油气资源与探测国家重点实验室(中国石油大学(北京)),北京 102249

2. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249

3. 中国石油杭州地质研究院,杭州 310023

4. 中国石化石油勘探开发研究院,北京 100083

摘要 利用高品质3D地震资料搜索刻画深水水道—朵叶复合体的沉积构成并揭示油气储集体的分布模式对于深水油气勘探具有重要的指导意义。利用PaleoScan全三维智能解释手段和三色(RGB)混相分频技术识别解剖了孟加拉扇上新统一更新统深水水道—天然堤体系6种富砂沉积单元,包括补给水道、分支水道、似点坝、决口扇、漫溢扇和末端朵叶。研究认为:补给水道、决口扇、末端朵叶是潜在的规模且优质深水油气储集体类型;而漫溢扇、分支水道和似点坝分别是潜在的规模非优质、非优质非规模以及优质非规模深水油气储层类型。补给水道主要分布在水道—朵叶复合体的上游和中游;决口扇、漫溢扇、分支水道和似点坝主要发育在水道—朵叶复合体的中游;而分支水道和末端朵叶主要分布在水道—朵叶复合体的下游。漫溢扇向供源水道一侧楔状增厚,形成“砂盖泥”的格局;而决口扇向供源水道一侧楔状减薄直至尖灭形成“泥包砂”的格局,相应形成海底扇岩性圈闭。

关键词 水道—朵叶复合体;海底扇;规模深水储集体;分布模式;岩性圈闭;孟加拉扇

第一作者简介 龚承林,男,1983年出生,博士,教授,博士生导师,深水沉积学和层序地层学,E-mail: chenglingong@cup.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标志码** A

0 引言

20世纪后半叶,在浊流理论建立的基础上,人类在被动陆缘深水盆地(如西非陆缘、墨西哥湾、北海和巴西外海等)发育展布的深水水道—朵叶复合体内获得了巨大的油气勘探发现^[1-3]。人们意识到深水水道—朵叶复合体是最重要的深水规模优质储集体的富存场所之一,并相继识别了补给水道、决口扇和末端朵叶等富砂沉积单元^[1,3-7]。在此基础上,建立了深水水道—朵叶复合体规模优质储集体的分布模式。其中比较有代表性的是William R. Normark博士发表在AAPG Bulletin第54期的论文中首次提出了补给水道—末端朵叶型(标准式)规模优质储集体的分布模式^[8]。标准式水道—朵叶规模优质储集体分布模式认为:补给水道会发展演化为分支水道,粗碎屑颗粒经由补给水道一分支水道在海底扇上搬运分散,相应堆积形成富砂的补给水道和富砂的末端朵

叶两大类沉积单元^[7,9-11]。在这一模式的指导下,人们在深水盆地获得了巨大的油气勘探成功。

21世纪以来,地震采集和解释技术的进步(如PaleoScan全三维智能解释手段)给深水水道—朵叶复合体的沉积构成带来了全新的认识(实例见文献[12-14])。譬如,利用三色(RGB)混相分频技术^[12,14]识别刻画了多种类型的决口扇。这些决口扇常常是水道内浊流决口溢岸的产物,可能含有粗碎屑颗粒,可以形成规模油气储集体^[15]。然而,标准式水道—朵叶储层分布模式并未体现决口扇作为油气储集体的重要意义。由此可见,亟待利用高品质的3D地震资料,精细刻画深水水道—朵叶复合体的沉积构成;进而揭示深水油气储集体的分布模式与成因机制。

本文利用中石油在孟加拉扇采集获取的1 500 km²三维地震资料,以“上新世和更新世两个典型的深水水道—朵叶复合体”为例(图1,2),采用PaleoScan全三维智能解释手段和三色(RGB)混相分频技术精细

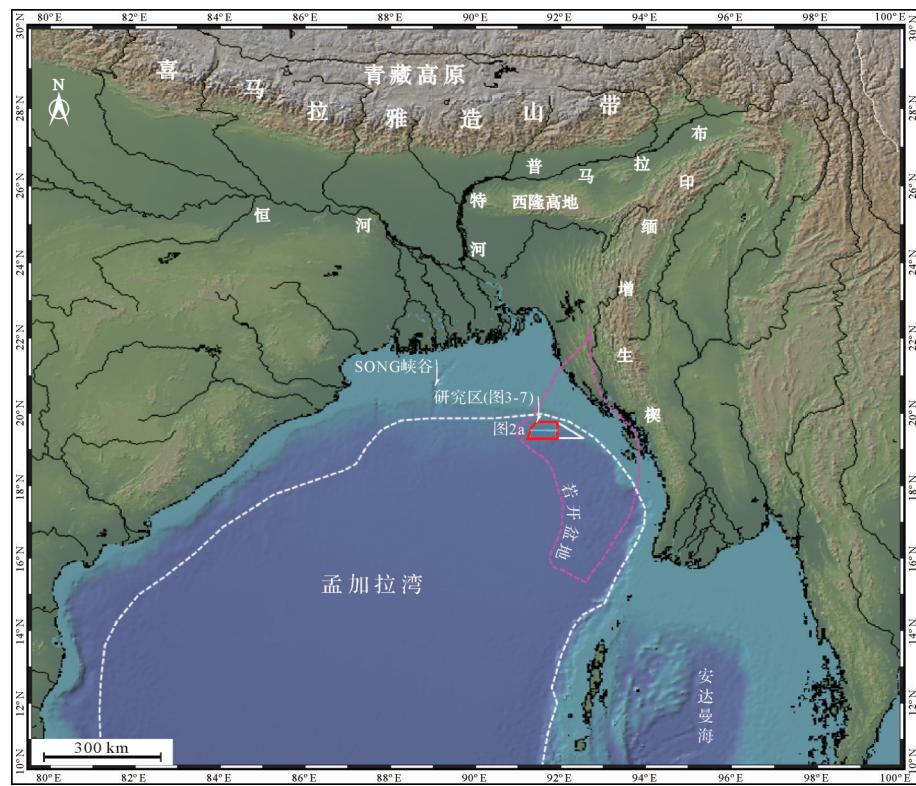


图1 研究区(若开盆地)区域地理位置(含图2a所示地震剖面的平面位置)

Fig.1 Topographic map showing location of the study area in Rakhine Basin and plan-view location of seismic line shown in Fig.2a

刻画并揭示了深水水道—朵叶复合体的沉积构成和规模储集体的分布模式,进而讨论了深水水道—朵叶复合体储集体的成因,以期更好地预测深水规模储集体的发育分布。本文对深水水道—朵叶复合体规模储集体储层质量的探讨主要基于重力流沉积动力学分析和文献调研,有待利用钻井取心资料进一步深入研究。

1 区域地质概况

研究区现今水深超过1 000 m,位于现今孟加拉扇上扇区域(图1)。孟加拉扇从早始新世开始形成发育,其发育演化是“古新世以来印度板块、欧亚板块及缅甸微板块的汇聚作用以及随后印缅—巽他俯冲带增生楔向西迁移”综合作用的结果^[16-17]。具体来说,自晚三叠世起与冈瓦纳大陆分离的印度板块向北快速漂移,至早古新世与欧亚大陆发生俯冲碰撞;从而在孟加拉湾北部形成板块碰撞造山带(喜马拉雅),同时在孟加拉湾西侧的印缅—巽他俯冲带增生楔也开始逐渐抬升^[16,18]。从早始新世开始,孟加拉湾北侧喜马拉雅山脉与西侧印缅—巽他俯冲带增生楔开始迅速隆升;所形成的大量粗碎屑颗粒经由布拉

马普特河—恒河被搬运至孟加拉湾,形成名副其实的世界第一大扇(孟加拉扇)(图1)。现今的孟加拉扇延伸长度达3 000 km,展布宽度约1 000 km,面积达 $3 \times 10^6 \text{ km}^2$,最大沉积厚度达16.5 km^[19-20]。

本文的研究区位于孟加拉扇东北缘、缅甸西部海域的若开盆地(图1)。该盆地长约850 km,宽约200 km;现今水深0~2 100 m,最大沉积厚度达12 000 m(图1)。若开盆地北部为迪桑复理石带、特里普拉—加贾尔褶皱带和吉大港褶皱带,盆地南部抵安达曼—尼科巴—巽他前渊盆地;西侧临近现今的SONG峡谷,而东侧与印缅蛇绿岩带相接(图1)^[21]。若开盆地主要经历了四期主要的沉积演化:1)白垩系为开阔海沉积环境,以海相泥岩沉积为主;2)古近系为半深海—深海沉积环境,主要发育小规模多期叠置水道和席状浊积朵叶,在岩性组合上以厚层海相泥岩夹薄层砂岩为主;3)新近系为半深海—深海沉积环境,主要发育复合水道、水道—堤岸复合体、浊积朵叶和小规模的块状搬运沉积,在岩性组合上以细砂岩、细粉砂岩与深灰色泥岩互层为主;4)第四系为深海沉积环境,主要发育水道—堤岸复合体、小规模的蛇曲无堤坝水道和大规模的块状搬运复合

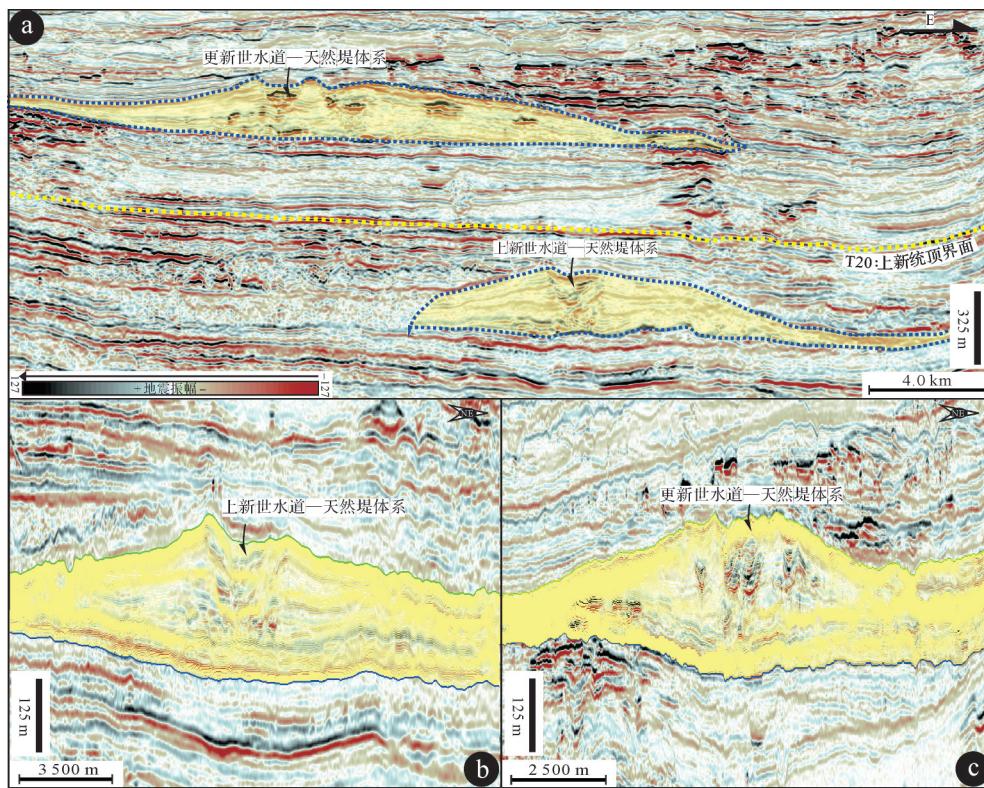


图2 (a)垂直物源的区域地震剖面(剖面位置见图1)示意了目的层(孟加拉扇上新统—更新统)以及两个目标水道—天然堤体系的剖面地震反射特征;(b,c)局部放大地震剖面描绘了孟加拉扇上新统—更新统水道—天然堤体系地层叠置体的剖面特征

Fig.2 (a) Strike-view seismic transect (see Fig.1 for line location) showing cross-sectional seismic appearance of the study interval of interest (Pliocene to Pleistocene Bengal Fan) and two documented channel-levee systems; (b, c) strike-view seismic transects showing a close-up view of horizon stacks of Pliocene to Pleistocene channel-levee systems on the Bengal Fan

体,在岩性组合上以中厚层砂岩及灰色、深灰色泥岩为主^[16,18,22]。

早中新世以来若开盆地形成发育大规模的深水重力流沉积体系(如水道—天然堤复合体、朵叶和块状搬运沉积等),这些重力流沉积体系的发育演化在宏观源—汇背景上主要受到雅鲁藏布江—布拉马普特河迁移改道的影响^[17]。如图2b所示的上新世深水水道—天然堤复合体以及图2c所示的更新世深水水道—天然堤复合体,是本文拟解剖的目标深水沉积体。

2 数据和方法

本文所使用的主要数据为中国石油天然气集团公司在孟加拉扇采集获得的高分辨3D地震数据(图1中的红色多边形)。三维地震数据面积约1 500 km²,覆盖水深1 300~2 100 m。三维地震资料的频宽为20~60 Hz,主频为12~45 Hz;目的层(上新统—更新统)主频约为40 Hz。地震资料的处理面元为

12.5 m×25.0 m,采样间隔为4 ms。3D地震数据被处理为零相位,以SEG负极性显示,在这样的剖面上正反射系数对应波阻抗的增加。

本文采用剖面地震地层学和平面地震地貌学相结合的手段,识别雕刻了两条目标水道—天然堤沉积体系内规模储集体的发育分布。剖面地震地层学分析主要依据地震反射的内部构成(振幅、频率和连续性)和外部形态(如透镜状、席状和楔状等)来识别解释水道—天然堤沉积体系内形成发育的富砂沉积单元。平面地震地貌学研究主要是依据地震反射的平面属性特征(本文采用三色混相分频属性)和外形样式(如条带状、朵状和舌状等)。所使用的三色(RGB)混相分频属性(图3~7)是一项对地质体进行成像检测的地球物理技术,可以显著提高常规地震砂体雕刻的精度(突破地震分辨率1/4波长限制)。这些技术已运用到砂体雕刻,能够对常规地震数据无法刻画的各种隐蔽沉积现象进行雕刻,并取得了良好的应用效果(实例见文献[12~14])。

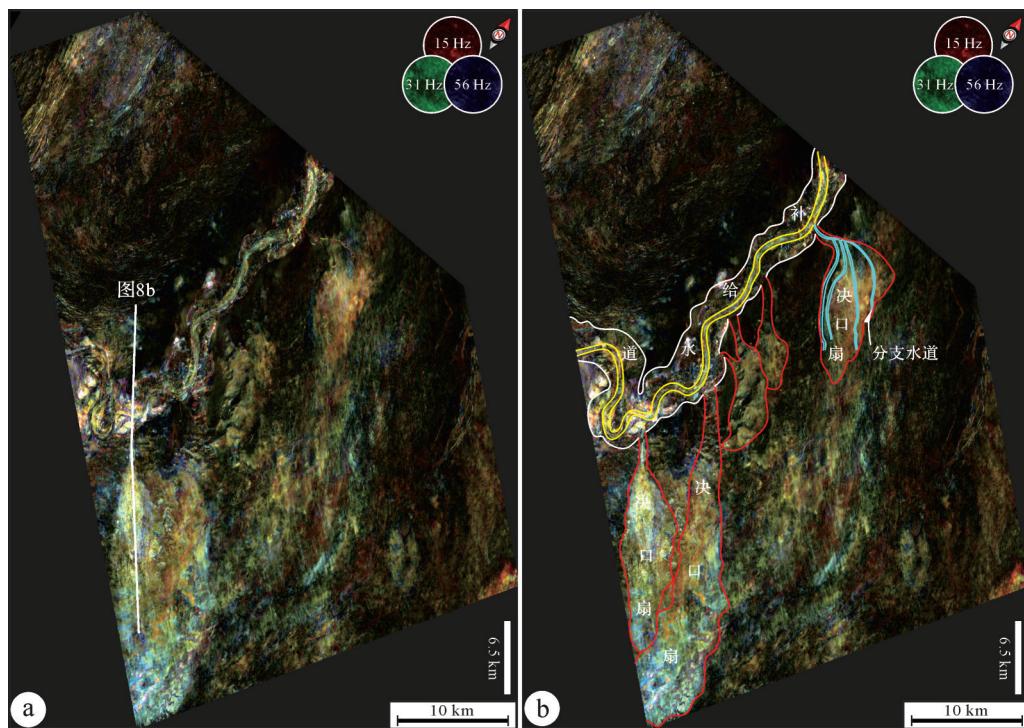


图3 三色(RGB)混相分频属性及其对应解释刻画了“上新世水道一天然堤体系及其所伴生的补给水道、决口扇和分支水道”平面地震地貌学特征

Fig.3 (a) Uninterpreted and (b) interpreted RGB spectral decomposition-attribute maps showing plan-view seismic geomorphological expression of Pliocene channel-levee systems and associated channel fills, crevasse splays, and distributary channels

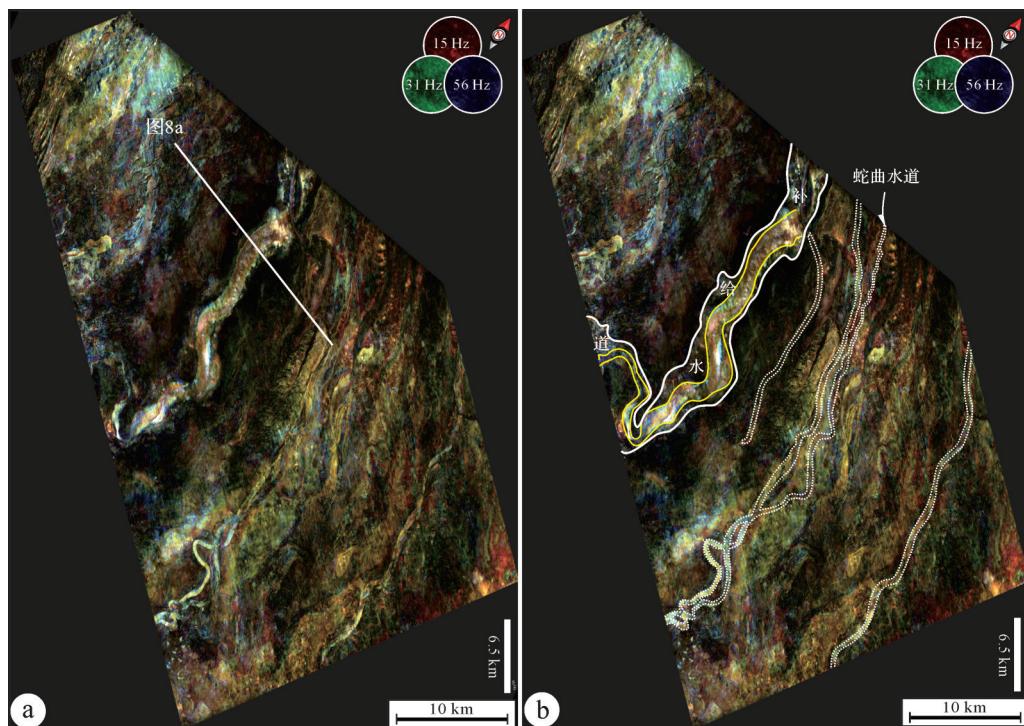


图4 三色(RGB)混相分频属性及其对应解释雕刻了“上新世水道一天然堤体系及其所伴生的补给水道”平面地震地貌学特征

Fig.4 (a) Uninterpreted and (b) interpreted RGB spectral decomposition-attribute maps showing plan-view seismic geomorphological expression of Pliocene channel-levee systems and associated channel fills

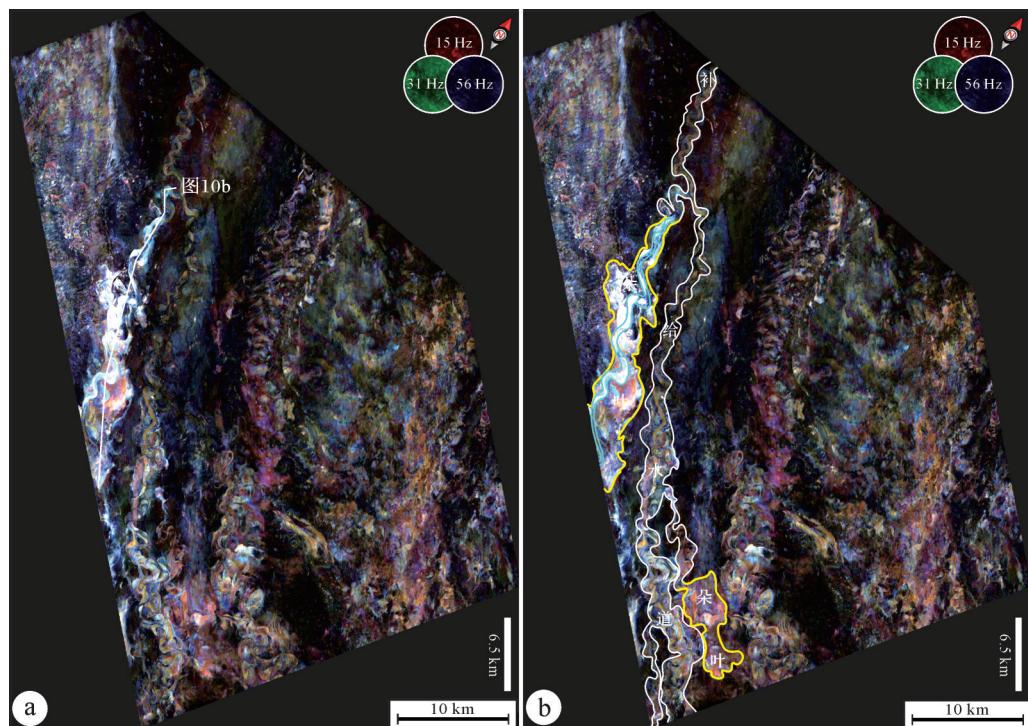


图5 三色(RGB)混相分频属性及其对应解释雕刻了“更新世水道一天然堤体系及其所伴生的补给水道和末端朵叶”平面地震地貌学特征

Fig.5 (a) Uninterpreted and (b) interpreted RGB spectral decomposition-attribute maps showing plan-view seismic geomorphological appearance of Pleistocene channel-levee systems and associated channel fills and terminal lobes

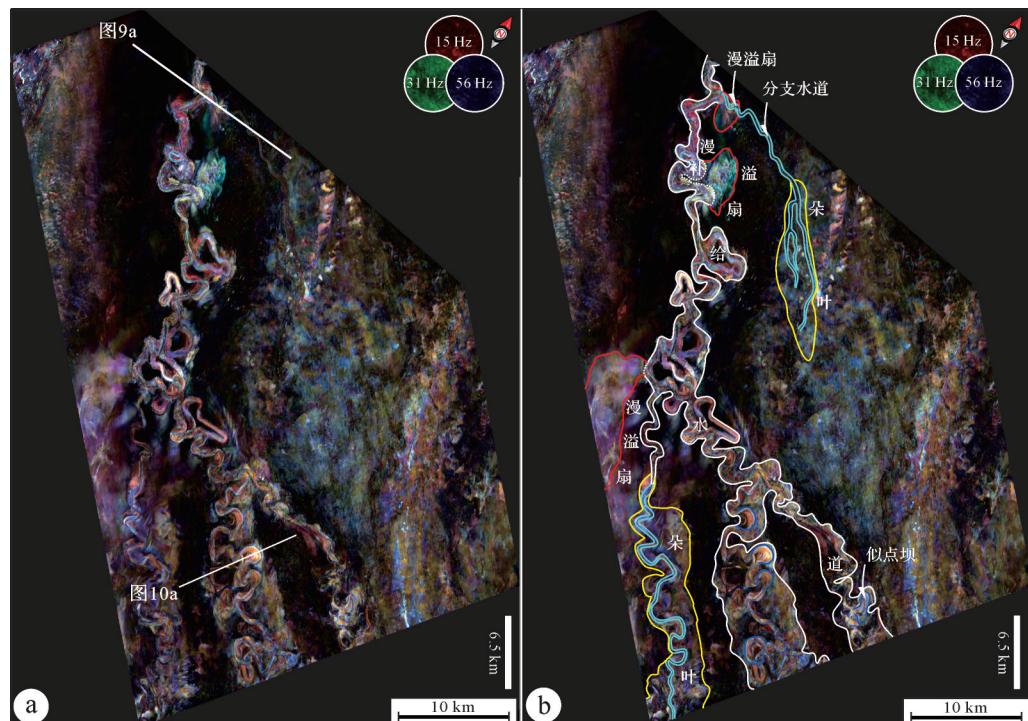


图6 三色(RGB)混相分频属性及其对应解释雕刻了“更新世水道一天然堤体系及其所伴生的补给水道、分支水道、似点坝、漫溢扇和末端朵叶”平面地震地貌学特征

Fig.6 (a) Uninterpreted and (b) interpreted RGB spectral decomposition-attribute maps showing plan-view seismic geomorphological appearance of Pleistocene channel-levee systems and associated channel fills, distributary channels, point bars, overbank splays, and terminal lobes

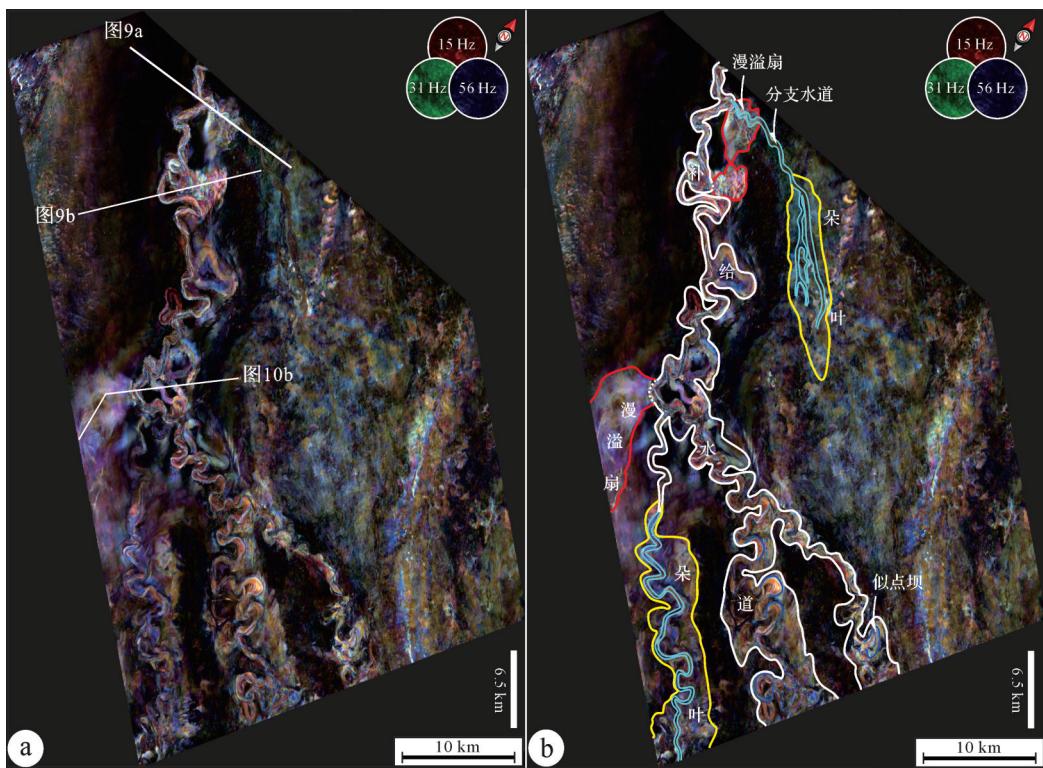


图7 三色(RGB)混相分频属性及其对应解释雕刻了“更新世水道一天然堤体系及其所伴生的补给水道、分支水道、似点坝、漫溢扇和末端朵叶”平面地震地貌学特征

Fig.7 (a) Uninterpreted and (b) interpreted RGB spectral decomposition-attribute maps showing plan-view seismic geomorphological manifestations of Pleistocene channel-levee systems and associated channel fills, distributary channels, point bars, overbank splays, and terminal lobes

PaleoScan软件采用一种基于地震数据相似性及地质一致性的价值函数,以整个地震数据体为计算对象,以已有的层位及断层数据作为约束条件,用最优化分析的思想对地震数据体进行空间解构。本文采用PaleoScan全三维智能解释平台完成对目标水道一天然堤沉积体系富砂沉积单元的雕刻,具体包括以下几步。首先,定义目标水道一天然堤体系的顶底界面(如图2b和2c中的绿色和蓝色层位),并对顶底界面进行闭合解释(解释精度为500 m×250 m)。其次,利用PaleoScan软件在目标水道顶底界面之间建模解释了100个层位,制作相应的层位堆叠体(如图2b和2c中的黄色层位)。第三,利用时频变换算法对原始地震数据进行分频处理,得到高(56 Hz)、中(31 Hz)、低(15 Hz)和三套单频数据体。最后,对这高中低三套单频数据体进行三色(RGB)模式混合显示,进而在所形成的具有通频信息的三色数据体上进行富砂沉积单元的识别与雕刻。

3 深水道—朵叶体系储集体成因分析与质量规模

在孟加拉扇上新统一更新统深水道一天然堤体系内共识别了6种富砂沉积单元,主要包括补给水道、分支水道、点坝、决口扇、漫溢扇和末端朵叶(表1)。

3.1 U型强振幅断续地震相:补给水道

3.1.1 地震相特征描述

在剖面上,U型强振幅断续地震相以“顶平底凸U型、强振幅—低频—断续充填反射”为主要特征,其切割下伏地层、可见明显的削截地震反射终止关系(图8、图9a、图10a、表1)。它们的两翼被呈楔状、弱振幅空白反射的天然堤所“夹持”,所形成的水道—天然堤复合体呈经典的“似一只展翅翱翔的海鸥般的鸥翼状”(图8、图9a、图10a)。在平面三色混相分频属性上,U型强振幅断续地震相呈宽窄不同(几百米到几千米不等)、弯曲度不一、延伸距离达数千

表1 海底扇储集体地震相、成因机制、储层规模和储层质量对比一览表

Table 1 Comparisons of seismic facies, formative mechanisms, reservoir scales, and reservoir qualities of different types of deep-water reservoir

储集体	剖面地震相	平面地震属性	成因解释	储层规模			储层质量
				宽度	厚度	面积	
补给水道	顶平底透镜状—强振幅—低频— 断续充填反射	宽窄不一、弯曲不一的强振幅亮色条带	以层流为主流动的重力流作用的结果	宽度:0.9~3.5 km	厚度:80~120 m	面积:40~50 km ²	高的砂泥比、储集物性较好,为“潜在的规模且优质”储集体
决口扇	楔状、强振幅—低频—中连续反射	叶片强振幅亮色条带	沟道化重力流经水道转弯处时流体剥离而成	宽度:3.0~7.4 km	厚度:77~182 m	面积:29~62.7 km ²	核部相对富砂、周缘相对富泥,为“潜在的规模非优质”储集体
漫溢扇	楔状、强振幅—低频—中连续反射	舌状强振幅亮色堆积体	低密度沟道化重力流溢岸堆积的产物	宽度:3.1~5.8 km	厚度:54~102 m	延伸:3.0~12.3 km	非均质性强、质量相对较差,为“潜在的规模非优质”储集体
末端朵叶	强振幅—低频—中连续反射	扇状强振幅亮色区域	限定性→半限定性或半限定性→ 非限定性的流体转换而成	厚度:30~60 km	平均厚度:50 m	面积:30~50 km ²	朵叶核部富砂、朵叶边缘富泥,为“潜在的规模且优质”储集体
分支水道	U型强振幅断续充填反射	窄而蛇曲的强振幅亮色条带	流体厚度小于分支水道的深度、 相对低能的浊流作用的结果	宽度:370~802 m	厚度:20~52 m	面积:<10 km ²	相对富泥,局部可能含细粉砂岩, 为“潜在的非优质非规模”储集体
似点坝	叠瓦状、中频—连续— 振幅强弱交替反射	同心半环状亮色混相分频属性条带	凹岸侵蚀—凸岸堆积差异侵蚀—沉积效应的产物	厚度:0~100 m	平均厚度:80 m	面积:2~5 km ²	底部储集性能好,上部发育泥岩隔层, 为“潜在的优质非规模”储集体

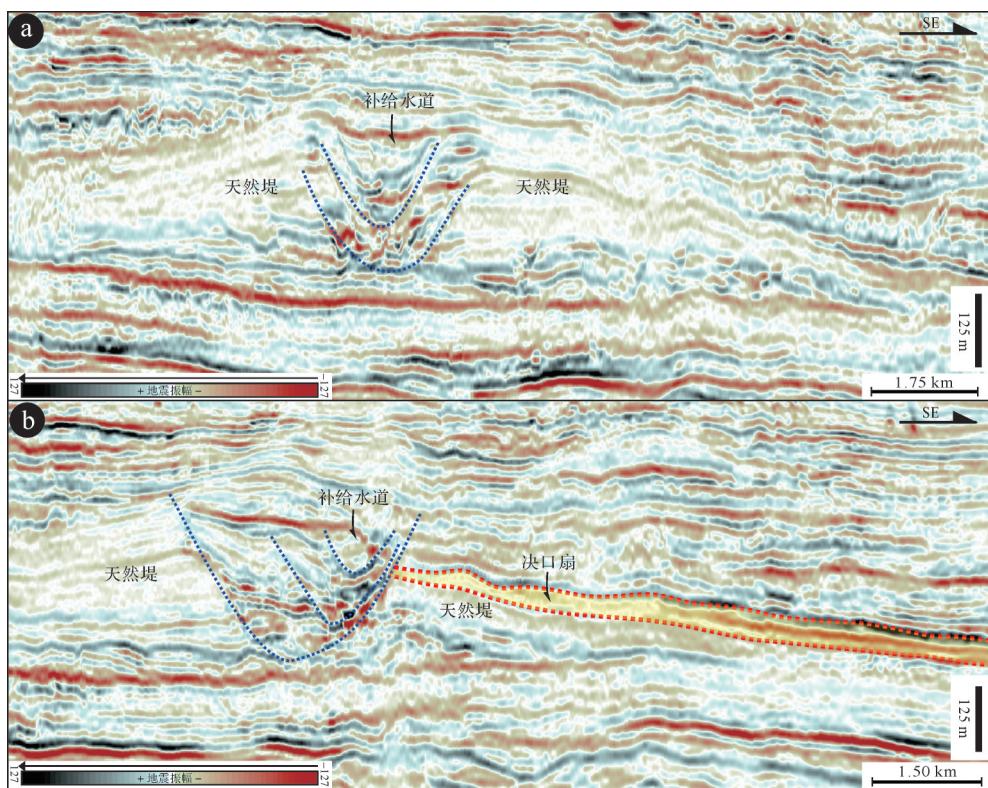


图8 垂直物源方向的地震剖面(图a所示剖面的平面位置见图4,图b所示剖面的平面位置见图3)
示意了上新世孟加拉扇补给水道和决口扇典型剖面地震反射特征

Fig.8 Depositional dip-oriented seismic traverses; dotted lines show cross-sectional seismic manifestations of channel fills and crevasse splays in Pliocene Bengal Fan. Map-view locations of panels a and b of this figure are shown in Figs.4 and 3, respectively

米的强振幅亮色条带(图3~7、表1)。这些强振幅亮色条带的弯曲度从如图4所示的相对低弯度(弯曲度小于1.2)到如图3和图5~7所示的蜿蜒且蛇曲(弯曲度大于1.2)不等。

3.1.2 地震相成因解释

在深水沉积环境中,剖面上呈鸥翼状、平面上蛇曲且蜿蜒的地震相常常被认为是富砂的补给水道^[4,6,10~11,14,21,23]。这些低弯度补给水道可能是以层流为主流动的高能重力流作用的结果(图4),而高弯度补给水道可能是以紊流为主流动的低能重力流作用的结果(图3,5~7)。这些水道常常被两翼的天然堤所“夹持”,表明形成这些补给水道的重力流的流体厚度大于水道深度,常伴随着重力流溢岸作用(图8、图9a、图10a、表1)。天然堤往往被认为是水道内重力流上部低密度部分(低密度浊流)溢岸而成的产物,往往相对富泥(多为纹层状粉砂岩、泥岩的频繁互层),不能形成油气储集体^[4,10~11]。故而,本文在分析海底扇规模储集体的分布模式与成因机制时暂不考虑这一地震相类型。

补给水道的富砂程度可以通过地震剖面上的同相轴上拱(Bump)程度来进行预判:一般而言,富砂的补给水道相较于两翼富泥的堤岸抗压实能力较强,故而同相轴上拱程度愈明显;富泥的补给水道相较于两翼富泥的堤岸抗压实能力较弱,因而同相轴上拱程度亦减弱^[24]。在岩性特征上,补给水道同相轴上拱现象并不明显,因而这些水道富砂程度相对中等到低,推测主要由中细砂岩和粉细砂岩组成(图8、图9a、图10a)。

3.1.3 储层规模与质量

在储层规模上,富砂的补给水道宽度900~3 500 m,平均宽度为2 000 m;厚度约80~320 m,平均厚度为190 m(图8、图9a、图10a、表1)。如图4所示的强振幅亮色条带(上新世补给水道)面积约46 km²,而如图7所示的强振幅亮色条带(上新世补给水道)面积约44 km²。

在储层质量上,补给水道是“浓度较小、粒度较细、密度较小、限定性较弱的低密度浊流”溢出形成堤岸,而“浓度较大、粒度较粗、密度较大、限定性较

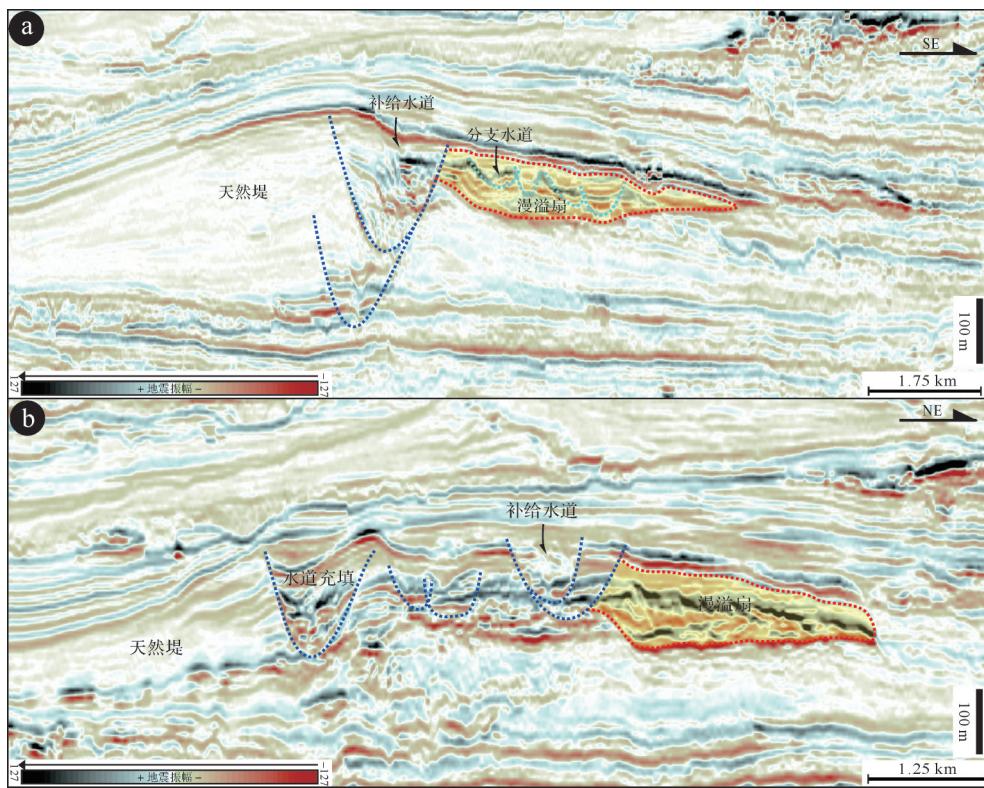


图9 垂直物源方向的地震剖面示意了更新世孟加拉扇补给水道、漫溢扇和分支水道
(图a所示剖面的平面位置见图6和7、图b所示剖面的平面位置见图7)典型剖面地震反射特征

Fig.9 Depositional dip-oriented seismic profiles; dotted lines show cross-sectional seismic manifestations of channel fills, overbank splays, and distributary channel fills on Pliocene Bengal Fan (panel a) and crevasse splays on Pleistocene Bengal Fan (panel b). Map-view locations of panels a and b of this figure are shown in Figs.6 and 7, respectively

强的底部高密度浊流”多次冲刷滞留后的产物。露头和钻井资料显示补给水道往往为重力流高能事件作用的结果,沉积物粒度较粗,以砾岩、含砾砂岩、砂岩及粉砂岩为主^[6,11,23]。由此可见,补给水道是重力流高能事件的产物,具有较高的砂泥比;是水道—朵叶复合体中最为富砂的沉积单元,往往具有相对较好的储集物性^[4,6,10,23,25]。

综上所述,主补给水道是一类“潜在的规模且优质”的油气储集体,是较为常见的一类深水油气储集体(图11b、表1)。

3.2 叶状强振幅地震相:决口扇

3.2.1 地震相特征描述

在顺物源方向的剖面上,叶状强振幅地震相呈“楔状、强振幅—低频—中连续反射”,具有明显地向供源水道一侧楔状减薄的厚度变化特征;它们的顶底被呈“弱振幅空白反射”的天然堤所包裹(图8b、表1)。在垂直物源方向的剖面上,叶状强振幅地震相具有明显地向两翼侧向尖灭的厚度变化特征,整体上呈平缓的丘型。它们在平面三色(RGB)混相分

频属性上呈“叶状、强振幅亮色条带”,且常常发育在补给水道弯度陡变的转弯处(图3、表1)。它们在靠近补给水道一侧的源头端呈窄且细长的条带,在远离补给水道一侧的末梢端呈扇状;整体上构成类似带叶茎的树叶状形态特征(叶状)(图3)。

3.2.2 地震相成因解释

在深水沉积环境中,发育在补给水道拐弯处“剖面上呈席状强振幅连续反射、平面上呈叶状强振幅区域”的地震相常常被解释为决口扇(crevasse splays)^[10-11,14-15,26]。一般而言,水道内沟道化重力流常常呈“双层”结构,由“浓度较大、粒度较粗、密度较大、限定性较强的底部高密度浊流”和“浓度较小、粒度较细、密度较小、限定性较弱的顶部低密度浊流”构成。当具有双层结构的沟道化重力流流经水道转弯处时,若流体厚度大于水道深度时会产生流体剥离作用,在溢出点处撕开一个“豁口”^[27-29]。被剥离出来的浊流旋即会对先期地层进行侵蚀切割、形成一条窄而细长的流动路径;高密度和低密度混杂的沟道化重力流可沿着豁口流向水道堤岸的低洼处,由

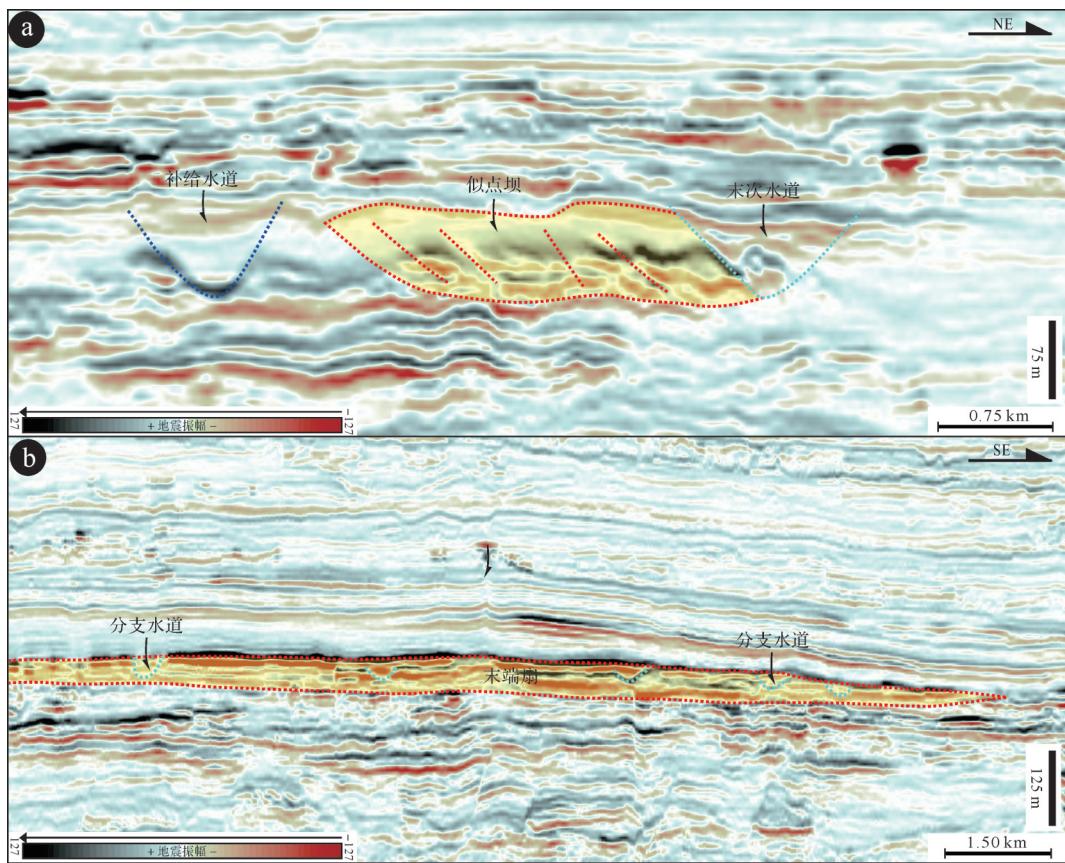


图 10 垂直物源方向的地震剖面示意了更新世孟加拉补给水道和似点坝(图 a, 剖面位置见图 6)和更新世孟加拉末端朵叶(图 b, 剖面位置见图 5)典型剖面地震反射特征

Fig.10 Depositional dip-oriented seismic profiles; dotted lines show cross-sectional seismic appearance of channel fills and point bars on Pliocene Bengal Fan (panel a) and terminal lobes on Pleistocene Bengal Fan (panel b). Map-view locations of panels A and B of this figure are shown in Figs.6 and 5, respectively

于限定性变弱造成沉积物堆积卸载而形成决口扇(图3、表1)。

3.2.3 储层规模与质量

在储层规模上,如图3所示的上新世孟加拉扇5期决口扇最大宽度3.0~7.4 km(均值为5.4 km),最大厚度77.0~182.0 m(均值为124.8 m),延伸距离9.9~30.2 km(均值为16.9 km),平面面积29.0~62.7 km²(均值为41.3 km²)(表1)。显而易见,决口扇的扇体规模较大,是一类规模性深水油气储集体。

在储层质量上,沟道化重力流下部粒度较粗的高密度浊流可沿着“豁口”搬运至天然堤上低洼处堆积,形成可见高密度浊流产物(砂岩或粉细砂岩)的决口扇^[15]。一般而言,从“决口扇核部→周缘”,浊流的流速不断减低,湍流作用会减弱并转换为层流;从而导致决口扇核部相对富砂(多见正粒序砂岩),周缘相对富泥(多见粉砂质泥岩或泥岩)^[3,15]。李建平

等^[3]研究指出北海盆地形成发育的决口扇主要由正韵律细砂岩、粉砂岩和泥岩组成,可见层理构造和生物潜穴。在垂直物源方向的剖面上,“决口扇的厚度越来越薄、振幅亦越来越弱”,这一厚度和振幅变化趋势也反映了决口扇核部相对富砂而周缘相对富泥的砂体展布特征。因而,决口扇核部相对富砂,储层质量相对较好;而其周缘相对富泥,储层质量则相对较差。

综上所述,决口扇是一类“潜在的规模且优质”的油气储集体(图11b、表1)。

3.3 舌状强振幅地震相:漫溢扇

3.3.1 地震相特征描述

在剖面上,舌状强振幅地震相与前已述及的决口扇具有相似的剖面地震地层学特征,均表现为“楔状、强振幅—低频—中连续地震反射”(图9a,b、表1)。在平面上,舌状强振幅地震相与前已述及的决口扇

具有相似的平面地震地貌学特征,均发育在补给水道弯度陡变的拐弯处,以“强振幅亮色堆积体”为主要特征(图6,7、表1)。然而舌状强振幅地震相与决口扇显著不同的是:1)在剖面地层厚度变化上,舌状强振幅地震相表现为明显地向供源水道一侧楔状增厚,而决口扇则向供源水道一侧楔状减薄(图8b、图9a,b);2)在与围岩接触关系上,舌状强振幅地震相披覆在弱振幅空白反射天然堤之上,而决口扇则被天然堤所包裹(图8b、图9a,b);3)在平面形态上,舌状强振幅地震相呈宽而延伸距离短的舌状,而决口扇则呈非窄且延伸距离长的叶状(图6,7)。

3.3.2 地震相成因解释

在深水沉积环境中,与补给水道相伴生的“剖面上席状、平面上舌状的强振幅—低频—连续反射”常常被解释为溢岸浊流所形成的扇形堆积体^[10-11,14-15,26]。与前述决口扇不同的是:舌状强振幅地震相在水道相拐弯处的浊流溢出口比决口扇的浊流溢出口明显要宽(图6,7)。这一平面地貌特征反映形成舌状强振幅地震相的浊流整体上以越岸漫溢为主,而非形成一个细长豁口式补给通道(图6,7)。因而,我们将舌状强振幅地震相解释定义为漫溢扇(overbank splays)。

3.3.3 储层规模与质量

在储层规模上,更新世孟加拉扇3期漫溢扇最大宽度3.1~5.8 km(平均最大宽度为4.1 km),最大厚度54~102 m(平均最大厚度为81 m),延伸距离3.0~12.3 km(平均延伸距离为6.9 km)(图6,7、表1)。由此可见,与决口扇和末端朵叶一样,漫溢扇也是一类规模性深水油气储集体。

在储层质量上,漫溢扇是沟道化重力流上部粒度较细的低密度浊流整体上漫溢至天然堤上低洼处堆积而成,所形成的扇体整体上以细粒低密度浊流产物为主,相对富泥^[15]。目前,关于漫溢扇的研究实例相对鲜见,较为全面的研究报道来自文献[15];该研究利用来自孟加拉湾西部海域、戈达瓦里三角洲(Godavari delta)前方约80 km的KG-D6区块的地震和岩心资料识别了漫溢扇,研究认为漫溢扇主要由泥夹薄层砂构成,储层非均质性强,储层质量相对较差。

综上所述,漫溢扇是一类“潜在的规模非优质”的油气储集体(图11b、表1)。

3.4 扇状强振幅地震相:末端朵叶

3.4.1 地震相特征描述

在剖面上,扇状强振幅地震相以“强振幅—低频—连续地震反射”为主,向盆地一侧呈楔状减薄直至尖灭(图10b、表1)。这些强振幅—低频—连续地震反射彼此之间相互平行,对下伏地层没有明显地侵蚀下切作用,呈席状(图10b)。在平面上,扇状强振幅地震相与前述决口扇和漫溢扇具有相似的地震地貌学特征,以“扇状强振幅亮色混相分频属性”为主要特征(图6,7、表1)。与决口扇和漫溢扇截然不同的是:扇状强振幅地震相形成发育在补给水道的末端,而非补给水道侧翼的堤岸沉积环境中(图5~7)。这些扇状强振幅地震相常常被窄而蛇曲的分支水道(下述的小型强振幅断续下切地震相)所侵蚀、下切(图5~7)。

3.4.2 地震相成因解释

在深水沉积环境中,水道末端的“剖面上席状、平面上扇状的强振幅连续反射”常常被解释为末端朵叶^[10-11,14,30-31]。深水水道内沟道化重力流上部“浓度小、密度小、粒度细、限定性弱的低密度浊流”可剥离形成天然堤,或溢岸形成决口扇或漫溢扇;而“浓度大、密度大、粒度粗、限定性强的底部高密度浊流”会继续向前搬运^[27-29]。当这些高密度浊流流经水道—朵叶过渡带和前方朵叶主体时,会经历“限定性→半限定性”以及“半限定性→非限定性”的流体转换^[28-29,32]。无论是经历“限定性→半限定性”亦或“半限定性→非限定性”的流体转换,均伴随着流体性质的转换;从而造成高能重力流所携带搬运的粗粒沉积物发生卸载堆积,形成相对富砂的末端朵叶^[11,30](表1)。伴随着浊流在末端朵叶上由近至远向盆地一侧流动,沟道化重力流的限定程度越来越弱,流速也就越来越低直至完全停滞形成朵叶边缘。相应地朵叶的规模也越来越大,并不断侧向迁移、垂向叠置,最终在末端终止呈“扇状”。

3.4.3 储层规模与质量

在储层规模上,末端朵叶厚度30~60 m,平均厚度约50 m(图10b)。扇状亮色混相分频属性(末端朵叶)的平面面积约为30~50 km²(图5~7、表1)。孟加拉扇上所识别的朵叶的平面规模明显大于决口扇、漫溢扇和似点坝等富砂沉积单元,是一类规模性深水油气储集体。

在储层质量上,沟道化重力流上部粒度较细的

低密度浊流常常会在补给水道段溢岸形成天然堤,而下部粒度较粗的高密度浊流经由主水道搬运至补给水道前方发生堆积;故而所形成的末端朵叶往往是高密度浊流的产物^[11,30]。末端朵叶常由多个单一朵叶叠置而成,单个朵叶一般由“核部、核缘、边缘和远缘”4部分组成^[3]。从“核部→核缘→边缘→远缘”,高能重力流的流速不断降低,湍流作用会减弱并转换为层流。李建平等^[3]研究指出北海盆地形成发育的朵叶核部主要由块状或正韵律砂岩组成,朵叶核缘主要由砂岩夹薄层纹层状泥岩组成;而朵叶边缘多为砂泥岩薄互层夹少许较厚层状砂岩,朵叶多见砂泥岩薄互层。因而,朵叶核部和核缘最为富砂,储层质量亦较好;而朵叶边缘和远源则相对富泥,储层质量一般较差^[3,30](表1)。

总体而言,末端朵叶是一类“潜在的规模且优质”的油气储集体(图11b、表1)。

3.5 小型强振幅断续下切地震相:分支水道

3.5.1 地震相特征描述

在剖面上,小型强振幅断续下切地震相与前已述及的U型强振幅断续地震相(补给水道)具有相似的剖面地震相特征,均表现为“U型强振幅断续下切充填”的剖面地震相特征(图8、图9a、图10a、表1)。相较于补给水道,这一地震相两翼不发育堤岸且剖面规模显著减小(图9a、图10a)。在平面上,小型强振幅断续下切地震相常常发育在末端朵叶和决口扇之上;呈窄而蛇曲的强振幅亮色条带(图3,5~7、表1)。这些蛇曲条带平面弯曲度大多大于1.2、蜿蜒距离从几千米到数十千米不等,整体上多呈放射状(图3,5~7)。

3.5.2 地震相成因解释

在深水沉积环境中,发育在朵叶或决口扇上的小型下切充填相常常被解释为分支水道^[10-11,14]。孟加拉扇更新世分支水道在主供水道的转弯处和主供水道的末端均有发育(图3,5~7)。分支水道的两翼不发育天然堤,表明形成分支水道的浊流流体厚度小于分支水道的深度。这些相对低能的浊流会对下伏末端朵叶或决口扇产生微弱地侵蚀下切作用,形成沟道化席状体(图3,5~7)。在分支水道的末端,沟道化重力流流速进一步减小变缓,彼时浊流将呈席状或发散状散开卸载堆积,形成非沟道化席状朵叶(图3,5~7、表1)。

3.5.3 储层规模与质量

在储层规模上,分支水道下切深度20~52 m,平均深度为35 m(图9a、图10a)。亮色混相分频属性(分支水道)的宽度370~802 m,平均宽度约519 m,平面面积一般小于10 km²(图3,5~7、表1)。故而,储层的规模相对较小,是一类非规模性深水油气储集体。

在储层质量上,分支水道一般不发育堤岸;因而与形成发育堤岸的补给水道不同的是沟道化重力流上部低密度浊流部分未发生溢岸,其和底部高密度浊流混杂堆积为分支水道。因而,所形成的分支水道相对富泥,岩性主要为细砂岩、粉砂岩泥岩等,发育槽模、变形构造、平行层理及水平层理等沉积构造^[6,11]。这些分支补给水道多见“微弱下凹”,局部可见“轻微上凸”;因而这些分支补给水道相对富泥,局部可能含细粉砂岩(图9a、图10a、表1)。

整体而言,分支水道是一类“潜在的非优质非规模”油气储集体(图1b、表1)。

3.6 叠瓦状侧积地震相:似点坝

3.6.1 地震相特征描述

在剖面上,叠瓦状侧积地震相以“叠瓦状、中频—连续—振幅强弱交替地震反射”为主要特征,由一系列彼此并排平行的叠瓦状地震反射构成(图10a、表1)。这些叠瓦状幅地震反射均倾向末次水道轴部,且平行于末次水道靠近凹岸(外岸)一侧的水道侧壁(图10a)。叠瓦状侧积地震相最大厚度可达100 m,且向末次水道一侧楔状增厚(图10a)。在平面上,叠瓦状侧积地震相由一系列相互彼此嵌套、同心半环状的亮色混相分频属性条带构成(图6,7、表1)。这些同心半环状亮色条带的弯曲度(半环长度与两端点直线距离之比)1.2~2.5,且由内环向外环依次增大(图6,7)。

3.6.2 地震相成因解释

在深水沉积环境中,与浊积水道相伴生的“叠瓦状、中频—连续—振幅强弱交替地震反射”常常被解释为“侧积体或似点坝”^[33-34]。侧积体或似点坝是由Abreu *et al.*^[33]在研究西非安哥拉大陆边缘深水水道沉积特征时首次提出的,其形态特征与陆上河流点坝极为相似;但其发育规模、沉积环境、形成过程和成因机制与河流点坝均不相同^[33,35]。故而,我们将孟加拉扇更新世水道—朵叶复合体上识别的“叠瓦状侧积地震相”解释为“似点坝”(图6,7)。一般而言,高弯度水道是“垂直物源方向侧向摆动(swing)”和“顺物

源方向顺流迁移(sweep)”综合作用的结果。在流体动力学上,沟道化重力流流经水道弯曲带(bend)时在垂直物源方向会产生次生螺旋环流;该次生螺旋环流的流动方向与陆上曲流河次生环流流动方向相反^[29]。这一次生螺旋环流在蛇曲水道弯曲带处产生“凹岸侵蚀—凸岸堆积”的差异侵蚀—沉积效应,从而驱动水道不断向凹岸(外岸)一侧迁移叠加,形成彼此并排平行的叠瓦状前积地震反射(图10a、表1)。似点坝下部表现为明显的“强振幅—中频—断续地震反射”,推测为相互切叠、多期水道底部粗粒(中—细砂岩)组成的连通性好富砂沉积;上部表现为明显的“弱振幅—低频—中连续地震反射”推测为低密度泥岩侧积层。

3.6.3 储层规模与质量

在储层规模上,似点坝的厚度0~100 m,平均厚度为80 m(图10a)。其中5个同心半环状亮色混相分频属性(似点坝)平面面积2~5 km²,平均面积约3 km²(图6,7)。储层的规模相对较小,是一类非规模性深水油气储集体。

在储层质量上,似点坝是多期沟道化重力流凹岸侵蚀—凸岸堆积综合作用的结果。似点坝发育初期侵蚀形成初始水道,在次生环流作用下水道的凹岸(外岸)因侵蚀变陡垮塌而不断向凹岸一侧后撤;而次生环流则将侧向搬运而来的粗粒沉积物和沟道化重力流底部高密度组分输运至凸岸(内岸)一侧堆积(谷底粗粒滞留沉积)形成似点坝。由此可见,似点坝底部为水道谷底粗粒滞留沉积相互叠加迁移作用的结果,不发育泥岩隔层,且易于形成横向连续性较好、储集性能优越的堆积体(中—粗砂层或砾岩层)^[33-34]。

综上所述,分支水道是一类“潜在的优质非规模”油气储集体(图11b、表1)。

4 深水水道—朵叶体系储集体分布模式与研究意义

本文识别刻画了孟加拉扇上新统一更新统深水道—天然堤体系形成发育的6种富砂沉积单元的分布模式,以期更好地预测深水规模储集体的发育分布(图11b)。

4.1 分布模式

利用 PaleoScan 全三维智能解释手段和三色(RGB)混相分频技术,本文识别解剖了孟加拉扇上

新统一更新统深水道—天然堤体系形成发育的6种富砂沉积单元,并从水力学分析角度研究了它们的储层规模和质量(图11b)。研究认为,1)“补给水道、决口扇和末端朵叶”是“潜在的规模且优质”油气储集体类型;2)“漫溢扇”是一类“潜在的规模非优质”油气储层类型;3)“分支水道”是一类“潜在的非优质非规模”油气储集体;4)“似点坝”是一类“潜在的优质非规模”油气储层类型(图11b)。需要指出的是,本文对这6种富砂沉积单元的储层质量分析主要基于流体动力学分析和文献调研,相关结论亟待钻井取心资料证实或证伪。

在储集体的平面分布模式上,深水水道—朵叶复合体上游主要发育补给水道;深水水道—朵叶复合体中游则主要发育补给水道、决口扇、漫溢扇、分支水道和似点坝;而深水水道—朵叶复合体下游主要发育分支水道和末端朵叶(图11b)。

相较于如图11a所示的经典的水道—朵叶的水道规模储集体的分布模式^[8-9],本文所提出的深水水道—朵叶复合体规模储集体的分布模式体现了三种常规手段难以识别的隐蔽富砂沉积单元(决口扇、漫溢扇和似点坝)作为油气储集体的重要作用,揭示了它们的发育展布(图11b)。因而,本文所提出的深水水道—朵叶复合体规模储集体的分布模式可用于更好地预测深水规模油气储集体的发育展布,具有重要的实践价值(图11b)。

4.2 研究意义

本文对孟加拉扇上形成发育的两个目标水道—天然堤沉积体系的富砂沉积单元用最新的 PaleoScan 全三维智能解释手段制作了层位堆叠体,进而利用时频变换算法对原始地震数据进行分频处理和三色(RGB)混相分频属性融合(图2~7)。这些层位堆叠体相较于传统的沿层切片或地层切片,层位的等时性更好(图2a,b)。在此基础上,识别雕刻了6种相对富砂的沉积单元。其中,补给水道、分支水道、点坝和末端朵叶的沉积特征在诸多文献中被广为研究报道^[4,10-11,14,23];而决口扇和漫溢扇相关研究则相对鲜见,仅 Lowe *et al.*^[15]研究报道了孟加拉湾西部海域KG-D6区块决口扇和漫溢扇的沉积特征。本文研究揭示了决口扇和漫溢扇的剖面地震地层学特征(图8b、图9,10)和平面地震地貌学特征(图3,6,7),相关研究对识别决口扇和漫溢扇具有一定的参考意义。

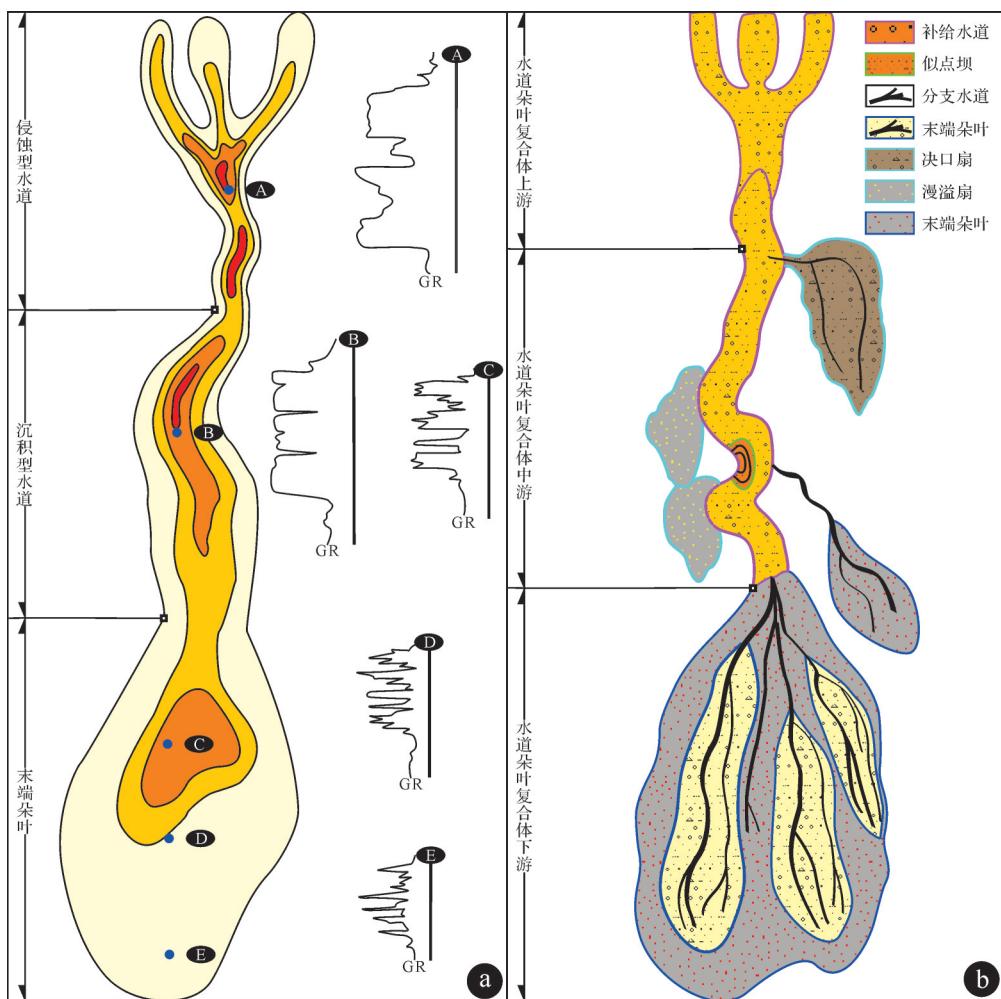


图 11 (a)经典的水道—朵叶的水道规模储集体的分布模式(据文献[9]修改);

(b)本文所提出的深水水道—朵叶复合体规模储集体的分布模式

Fig.11 Schematic illustrations of generic representative model of potentially productive deep-water reservoirs (modified from reference[9]) and proposed model of potentially productive deep-water reservoirs

此外,漫溢扇披覆在弱振幅空白反射(富泥天然堤)之上,且向供源水道一侧楔状增厚,形成“砂盖泥”的格局(图9)。与此不同的是,决口扇的顶底被弱振幅空白反射(富泥天然堤)所包裹,且向供源水道一侧楔状减薄直至尖灭,形成“泥包砂”的格局(图8b)。这一“泥包砂”的决口扇与围岩接触关系可以形成海底扇岩性圈闭,成为有利的岩性勘探目标。

5 结论

本文识别了孟加拉扇水道—朵叶复合体内6种富砂沉积单元的剖面地震地层学和平面地震地貌学特征,揭示了这6种富砂沉积单元的分布模式,以期对深水规模储集体的发育展布和油气勘探有所裨益。

深水储集体的地震地层和地震地貌特征:1)补给水道剖面上为鸥—翼状强振幅—低频—断续地震反射,平面上为顺直—弯曲的强振幅亮色条带;2)决口扇剖面上为楔状、强振幅—低频—中连续反射,平面上为叶状、强振幅亮色条带;3)漫溢扇剖面上为楔状、强振幅—低频—中连续地震反射,平面上为强振幅亮色区域;4)末端朵叶剖面上为强振幅—低频—中连续地震反射,平面上为扇状强振幅亮色混相频属性;5)分支水道剖面上为U型强振幅—低频—断续充填反射,平面上为窄而蛇曲蜿蜒的强振幅亮色条带;6)似点坝剖面上为叠瓦状、中频—连续地震反射,平面上为同心半环状亮色条带。

深水储集体的规模质量与成因分析:1)补给水道是沟道化重力流下部浓度大、粒度粗的高密度浊

流滞留产物,为可能的规模且优质储集体类型;2)决口扇为高能沟道化重力流沿着豁口流向水道堤岸低洼处形成的叶状堆积体,为潜在的规模且优质储集体类型;3)漫溢扇是沟道化重力流上部低密度浊流溢岸形成的舌状堆积体,为可能的规模非优质储集体类型;4)末端朵叶是高密度浊流经历限定性→半限定性或半限定性→非限定性的流体转换而形成的叶状堆积体,是一类潜在的规模且优质储集体;5)分支水道是沟道化重力流未发生溢岸所形成的条带状沉积体,是一类非优质非规模储集体;6)似点坝,是次生螺旋环流凹岸侵蚀—凸岸堆积的产物,是一类可能的优质非规模储集体。

深水储集体的分布模式:1)水道—朵叶复合体上游主要发育补给水道;2)水道—朵叶复合体中游主要发育决口扇、漫溢扇、分支水道和似点坝;3)水道—朵叶复合体下游主要发育分支水道和末端朵叶。其中中游发育分布的决口扇向供源水道一侧楔状减薄直至尖灭,与富泥的水道天然堤形成“泥包砂”的格局,可以形成一类重要的海底扇岩性圈闭。

致谢 本文是笔者基于横向课题(孟加拉扇深水水道—天然堤复合体沉积储层分布模式与形成机制研究,编号:2019D-4309)的进一步梳理,项目完成过程中得到了中国石油杭州地质研究院海洋所同行的帮助。两位审稿人提供了专业细致的审稿意见,令本文增色良多;在此一并致以诚挚的谢意。

参考文献(References)

- [1] Weimer P, Slatt R M. Introduction to the petroleum geology of deepwater setting [M]. AAPG Studies in Geology 57, 2007: 171-276.
- [2] 孙国桐. 深水重力流沉积研究进展[J]. 地质科技情报, 2015, 34(3): 30-36. [Sun Guotong. A review of deep-water gravity-flow deposition research [J]. Geological Science and Technology Information, 2015, 34(3): 30-36.]
- [3] 李建平,廖计华,方勇. 基于露头和岩心的深水重力流沉积新认识及其油气地质意义[J]. 油气地质与采收率, 2020, 27(6): 30-37. [Li Jianping, Liao Jihua, Fang Yong. New understanding of deep-water gravity flow deposition and its significance in petroleum geology based on outcrops and cores [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(6): 30-37.]
- [4] Janocko M, Nemec W, Henriksen S, et al. The diversity of deep-water sinuous channel belts and slope valley-fill complexes [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 41: 7-34.
- [5] Deptuck M E, Sylvester Z. Submarine fans and their channels, levees, and lobes [M]//Micallef A, Krastel S, Savini A. Submarine geomorphology. Cham: Springer, 2018: 273-299.
- [6] 李华,何幼斌. 深水重力流水道沉积研究进展[J]. 古地理学报, 2020, 22(1): 161-174. [Li Hua, He Youbin. Research progress on deepwater gravity flow channel deposit [J]. Journal of Palaeogeography, 2020, 22(1): 161-174.]
- [7] 傅熔浦,刘群,胡修棉. 水下沉积物重力流与海底扇相模式研究进展[J]. 地球科学进展, 2020, 35(2): 124-136. [Fu Hanpu, Liu Qun, Hu Xiumian. Review on subaqueous sediment gravity flow and submarine fan [J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(2): 124-136.]
- [8] Normark W R. Growth patterns of deep-sea fans [J]. AAPG Bulletin, 1970, 54(11): 2170-2195.
- [9] Galloway W E, Hobday D K. Terrigenous clastic depositional systems: Applications to fossil fuel and groundwater resources [M]. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer, 1996: 489.
- [10] Posamentier H W, Kolla V. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings [J]. Journal of Sedimentary Research, 2003, 73(3): 367-388.
- [11] Posamentier H W, Kolla V, 刘化清. 深水浊流沉积综述[J]. 沉积学报, 2019, 37(5): 879-903. [Posamentier H W, Kolla V, Liu Huaqing. An overview of deep-water turbidite deposition [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(5): 879-903.]
- [12] Oluboyo A P, Gawthorpe R L, Bakke K, et al. Salt tectonic controls on deep-water turbidite depositional systems: Miocene, southwestern Lower Congo Basin, offshore Angola [J]. Basin Research, 2014, 26(4): 597-620.
- [13] Tillmans F, Gawthorpe R L, Jackson C A L, et al. Syn-rift sediment gravity flow deposition on a Late Jurassic fault-terraced slope, northern North Sea [J]. Basin Research, 2021, 33(3): 1844-1879.
- [14] Howlett D M, Gawthorpe R L, Ge Z Y, et al. Turbidites, topography and tectonics: Evolution of submarine channel-lobe systems in the salt-influenced Kwanza Basin, offshore Angola [J]. Basin Research, 2021, 33(2): 1076-1110.
- [15] Lowe D R, Graham S A, Malkowski M A, et al. The role of avulsion and splay development in deep-water channel systems: Sedimentology, architecture, and evolution of the deep-water Pliocene Godavari “A” channel complex, India [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 105: 81-99.
- [16] 周立宏,孙志华,汤戈,等. 孟加拉湾若开盆地D区块上新统异重流特征与沉积模式[J]. 石油勘探与开发, 2020, 42(7): 297-308. [Zhou Lihong, Sun Zhihua, Tang Ge, et al. Pliocene hyperpycnal flow and its sedimentary pattern in D block of Rakhine Basin in bay of Bengal [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 42(7): 297-308.]
- [17] Pickering K T, Carter A, Andò S, et al. Deciphering relationships between the Nicobar and Bengal submarine fans, Indian Ocean [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 544: 116329.
- [18] 周立宏,孙志华,王振升,等. 印缅俯冲增生楔气烟囱分带性

- 及油气成藏规律[J]. 地学前缘, 2017, 24(4): 352-369. [Zhou Lihong, Sun Zhihua, Wang Zhensheng, et al. Zonation and hydrocarbon accumulation rules of gas chimney in the Indo-Burmese Wedge [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24 (4) : 352-369.]
- [19] Curray J R, Emmel F J, Moore D G. The Bengal Fan: Morphology, geometry, stratigraphy, history and processes [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2002, 19(10): 1191-1223.
- [20] Yang S Y, Kim J W. Pliocene basin-floor fan sedimentation in the bay of Bengal (offshore northwest Myanmar) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 49: 45-58.
- [21] 马贵明, 马宏霞, 邵大力, 等. 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[J]. 海相油气地质, 2016, 21(1): 41-51. [Ma Guiming, Ma Hongxia, Shao Dali, et al. Structural units and evolution model of deepwater depositional system in Rakhine Basin, bay of Bengal[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2016, 21(1): 41-51.]
- [22] Ma H X, Fan G Z, Shao D L, et al. Deep-water depositional architecture and sedimentary evolution in the Rakhine Basin, northeast Bay of Bengal[J]. *Petroleum Science*, 2020, 17(3): 598-614.
- [23] Mayall M, Jones E, Casey M. Turbidite channel reservoirs-Key elements in facies prediction and effective development[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23(8): 821-841.
- [24] McHargue T, Pyrcz M J, Sullivan M D, et al. Architecture of turbidite channel systems on the continental slope: Patterns and predictions[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(3): 728-743.
- [25] Li P, Kneller B C, Hansen L, et al. The classical turbidite outcrop at San Clemente, California revisited: An example of sandy submarine channels with asymmetric facies architecture[J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 346: 1-16.
- [26] Maier K L, Fildani A, Paull C K, et al. Deep-sea channel evolution and stratigraphic architecture from inception to abandonment from high-resolution Autonomous Underwater Vehicle surveys offshore central California[J]. *Sedimentology*, 2013, 60 (4): 935-960.
- [27] Peakall J, Amos K J, Keevil G M, et al. Flow processes and sedimentation in submarine channel bends[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(6/7/8/9): 470-486.
- [28] Wynn R B, Cronin B T, Peakall J. Sinuous deep-water channels: Genesis, geometry and architecture[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(6/7/8/9): 341-387.
- [29] Janocko M, Cartigny M J B, Nemec W, et al. Turbidity current hydraulics and sediment deposition in erodible sinuous channels: Laboratory experiments and numerical simulations [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 41: 222-249.
- [30] Prélat A, Hodgson D M, Flint S S. Evolution, architecture and hierarchy of distributary deep-water deposits: A high-resolution outcrop investigation from the Permian Karoo Basin, South Africa[J]. *Sedimentology*, 2009, 56(7): 2132-2154.
- [31] Doughty-Jones G, Mayall M, Lonergan L. Stratigraphy, facies, and evolution of deep-water lobe complexes within a salt-controlled intraslope minibasin[J]. *AAPG Bulletin*, 2017, 101 (11): 1879-1904.
- [32] Peakall J, Sumner E J. Submarine channel flow processes and deposits: A process-product perspective [J]. *Geomorphology*, 2015, 244: 95-120.
- [33] Abreu V, Sullivan M, Pirmez C, et al. Lateral accretion packages (LAPs): An important reservoir element in deep water sinuous channels[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(6/7/8): 631-648.
- [34] 卓海腾, 王英民, 徐强, 等. 南海北部莺歌海盆地东方区上新统侧积复合体沉积特征及成因[J]. 古地理学报, 2013, 15(6): 787-794. [Zhuo Haiteng, Wang Yingmin, Xu Qiang, et al. Sedimentary characteristics and genesis of lateral accretion packages in the Pliocene of Dongfang area of Yinggehai Basin in northern South China Sea [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2013, 15 (6): 787-794.]
- [35] Kolla V, Posamentier H W, Wood L J. Deep-water and fluvial sinuous channels: Characteristics, similarities and dissimilarities, and modes of formation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(6/7/8/9): 388-405.

Distribution Patterns and Genetic Analyses of Potentially Productivegood Deep-water Reservoirs: A case study from the Pliocene-Pleistocene Bengal Fan

GONG ChengLin^{1,2}, ZHU YiJie², SHAO DaLi³, GUO RongTao⁴, GE DaoYao², DING LiangBo³, QI Kun², MA HongXia³

1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China

2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

3. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou 310023, China

4. SINOPEC Petroleum Exploration and Production Research Institute, Beijing 100083, China

Abstract: Research on the architecture of deep-water channel-lobe complexes and distribution patterns of potentially productive deep-water reservoirs has practical implications for deep-water hydrocarbon exploration. This study used PaleoScan-based 3D intelligent interpreting approach and RGB color blending of spectral decomposition to document five sandy deep-water elements: channel fills, distributary channel fills, point bars, crevasse splays, overbank splays, and terminal lobes. Channel fills, crevasse splays and terminal lobes are recognized as types of large-scale and high-quality deep-water reservoir, whereas distributary channel fills are considered to be a type of small-scale and low-quality deep-water reservoir. Overbank splays are interpreted as large-scale but low-quality deep-water reservoirs. Point bars are interpreted as small-scale but high-quality deep-water reservoirs. Channel fills occur along the upper and middle segments of channel-lobe complexes. Crevasse splays, overbank splays, distributary channel fills and point bars are mainly evident along the middle segments of channel-lobe complexes. Distributary channel fills and terminal lobes mainly occur along lower segments of channel-lobe complexes. Overbank splays have a wedged-shape pattern with thickness increasing towards the main feeder channels, forming sandy deposits overlain by muddy elements. Crevasse splays also exhibit wedged-shape patterns, but with thickness decreasing towards main feeder channels, forming sandy deposits blanketed by muddy elements and forming lithological traps on submarine fans.

Key words: channel-lobe complexes; submarine fan; large-scale deep-water reservoirs; distribution patterns; lithological traps; Bengal Fan