

深水浊积水道构型要素特征及三维分布模拟

张文彪,段太忠,刘彦锋,李蒙,徐睿

(中国石化石油勘探开发研究院 北京 100083)

摘要:在深水油气田勘探、评价和开发中,浊积水道砂岩以其重要性和复杂性著称,由于其较强的非均质性及当前认识的局限性,导致已有沉积模式在实际开发应用中出现种种矛盾。基于岩心、测井、野外露头和高频地震等信息,对限制型下切水道体系(三级构型)内部岩相进行划分及特征描述,从岩性变化的角度总结了浊积水道构型模式,并通过多级建模的方法对岩性分布进行三维模拟。研究表明:地震资料可识别的浊积水道构型要素类型主要包括4种,从水道底部到顶部的发育顺序包括底部滞留沉积、滑塌碎屑流沉积、高净毛比叠置河道砂沉积和低净毛比天然堤型水道沉积,每期河道砂体均由不同比例的这几部分构型要素组成。水道体系(三级构型)内部四级~五级水道在迁移摆动过程中反复的下切和充填,是造成现今储层非均质性较强的最直接原因。浊积水道构型三维模拟结果,体现了岩相变化的韵律性及相控约束的特点,直接影响开发方案设计和井网优化。

关键词:浊积水道;岩相;沉积构型;地质建模

中图分类号:TE121.3 **文献标识码:**A

Characteristics and 3D distribution simulation of architecture elements in deep-water turbidity channels

Zhang Wenbiao, Duan Taizhong, Liu Yanfeng, Li Meng, Xu Rui

(Petroroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: The turbidity channel sandstone is noted for its importance and complexity in deep-water oil and gas fields' exploration, evaluation and development. Due to its high heterogeneity and limitations in current study, various contradictions exist between the existing sedimentary models and observations in the practical application. Based on the information derived from core and outcrop observation, well logging, and high-frequency seismic tests, we categorized the internal facies of restricted incised channel system (Grade 3 configuration) and described their features. The turbidity facies model was summarized from the perspective of lithological cycles, and the lithologic 3D distribution was simulated by means of geologic modeling. The results show that, (1) four types of turbidite architecture elements could be identified from the seismic data, including lag deposits, slump debris flow deposits, superimposed channel sand deposits with high net-to-gross ratio (NTG) and natural levee channel deposits with low NTG, occurring from the bottom of the channel to the top. The turbidite channel sand bodies at every cycle are composed of these four architecture elements in varying proportions. (2) Grade 4-5 channels within the turbidite channel system (Grade 3 configuration) incise and fill repeatedly in the process of migration and swinging, which is the immediate reason for the high reservoir heterogeneity at present. (3) The 3D simulation of the turbidite channel architecture reconstructs the rhythmicity of lithological change and features of facies-controlled constraints, which can guide the design of development scenarios and optimization of well patterns.

Key words: turbidity channel, lithofacies, sedimentary architecture, geological modelling

在深水勘探开发过程中,浊积水道被认为是最重要的储集体类型之一。过去10~20年,研究技术手段

的进步,大大推动了浊积水道储层的认识,主要基于海上高品质三维地震资料,大量的钻井取心、测井等资

收稿日期:2017-07-17;修订日期:2018-06-09。

第一作者简介:张文彪(1984—),男,工程师,精细油藏描述及开发地质。E-mail:zwb_syky@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05033-003-002);中石化科技部项目(P170004-4)。

料^[1-2]。综合地下钻井数据、野外露头、现代沉积及浅层沉积等认识,开展了大量精细的综合研究,主要集中在水道形态、沉积过程、单个或复合水道体系的关系研究,极大丰富了浊积水道沉积储层的认识。

基于地震资料开展浊积水道解释过程中,复合水道尤其是限制型复合水道内部反射特征杂乱,剖面地震相和下切特征明显,水道呈现出一系列下切叠置模式,且水道叠置存在一定规律性,帮助我们评价水道砂体储层特征。然而,生产实践发现,仅以单一水道作为构型表征的最小级次,满足不了开发中的要求,开发生产过程中遇到了较多诸如注水不见效、地质模型储量计算偏大等问题。主要原因在于,对单一浊积水道内部构型要素分布特征认知不足,而不同的构型要素类型决定了储层质量的差异,并直接影响储层的储集性能和渗流能力。本文研究的目的在于从已有水道层次叠置关系出发,通过岩心、测井、典型野外露头及高频地震资料,表征浊积水道储层内部构型要素结构和分布特征,并通过地质建模手段进行构型要素模拟实践,以期对浊积水道储层评价和开发工作起到一定指导作用。

1 研究概况

为准确表述浊积水道特征,前人定义了一系列相关术语能够描述不同构型级次的水道,包括地质体、复合水道、复合水道体系、水道体系和限制性水道体系,这些术语对于浊积水道构型表征具有重要意义^[2-3]。本研究沿用层序地层学的分析方法,对水道及其内部构型要素特征进行描述。浊积水道从上游到下游主要分为限制型(含下切谷型)、半限制型(下切谷发育但不明显)以及非限制型(无下切谷)。本文重点讨论限制型(含下切谷)水道体系,水道体系宽度1~3 km(或者更宽),厚度50~200 m(图1),常常具有稳定的下切基底以及复杂的内部充填结构。从层序地层角度分析,大型下切谷界面相当于三级界面(1~2 Ma),内部次级规模的侵蚀下切为四级(复合水道)和五级(单一水道)界面^[4-5]。目前定义的最小级次水道单元为单一水道,宽度几百米,厚度10~30 m。

浊积水道沉积主要受三级层序低位期的海平面升降影响。从生物地层分析角度看,三级层序界面主要

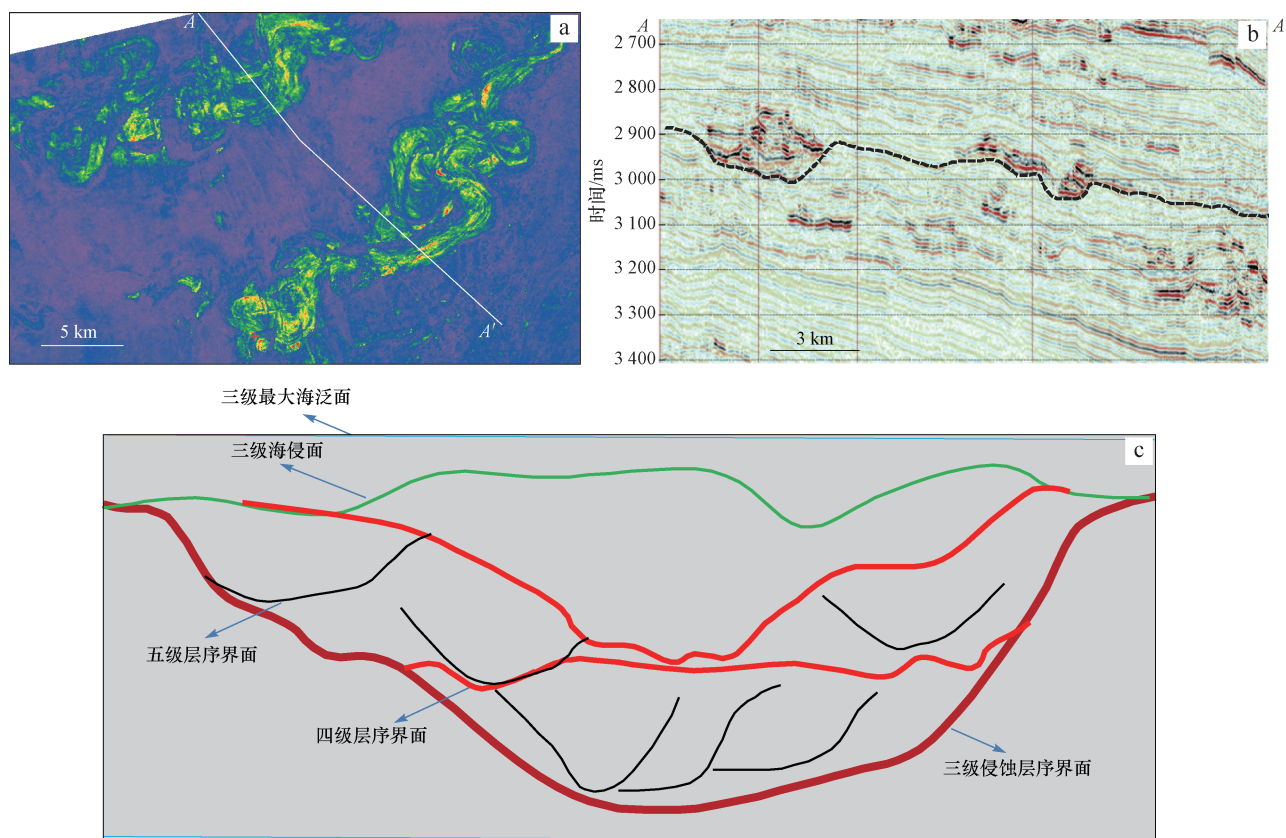


图1 限制型下切水道体系平面和剖面地震响应及三级—五级层序界面特征

Fig. 1 Seismic response of the restricted incised channel system in a cross section and boundary characteristics of Grade 3-5 sequences

a. 水道体系平面分布; b. 水道体系下切反射剖面; c. 水道体系内不同级次对应层序界面

是海侵时期形成的半深海泥岩^[6]。因此,低位域时期沉积的地层厚度(砂体为主)要比高位域时期的地层厚度(深海泥为主)厚得多。在三级层序内部可以对四级或五级构型进行特征分析,但随着远离物源位置,内部四级和五级层序水道呈现逐渐分叉的特征,相应的层序界面也越来越模糊。因此,准确的层序地层框架对于分析水道的演化及内部特征至关重要。

在实际分析过程中,准确的识别四级或五级层序界面比较困难。在陆坡体系中,水道迁移活动频繁,往往周期性的水道废弃源于自旋回作用,而水道的叠置源于高频的异旋回作用^[7-11]。因此,三级层序内,四级和五级水道的叠置受异旋回作用主导,而单一水道内部的岩石相组合主要受自旋回控制。正因为构型要素复杂和高频单一水道的切叠,使得水道体系内部四级和五级界面很难区分,高频地震资料能够识别复合水道(四级)和单一水道(五级);而对于地震数据不支持情况下,可以对四级和五级水道统一研究,以构型要素特征为出发点,从开发生产的角度分析储层非均质性,为定量评价储层特征及指导开发生产提供地质基础。

2 浊积水道构型要素分类及特征

浊积水道内岩石类型分布复杂,从分米级的砾石和砂体复合体到纯的泥质充填,形成了整个重力流的驱动过程,包括高密度和低密度浊流、泥石流、碎屑流、滑动、滑塌以及半深海泥岩沉积等^[12-13]。然而,尽管这些重力流沉积产物在浊积水道分析过程中均能見到,Mayall(2006)认为将以上几种沉积产物归结为4大类构型要素较为实用(图2)。包括:①底部滞留沉积;②碎屑流沉积;③高净毛比叠置水道沉积;④低净毛比天然堤型水道沉积。

划分依据主要包括:①从资料识别度来看,在地震资料中基本均可以识别;②这4类构型要素是描述和表征储层分布特性和储层非均质性的重要元素;③能够组成一个完整的纵向沉积序列,但不一定在所有的水道砂体中都保存完整;④在有利相带预测方面能够表征出可能存在的风险,以及对开发生产上的指导作用。将构型要素划分为这4种类型,可以为地质建模提供很好的模式指导,尤其是在基于地质模型指导开发方式上,该构型要素分类能够作为快速而系统的识别储层、非储层以及潜在隔夹层存在的基础。

2.1 底部滞留沉积

下切谷型限制型水道体系,往往在水道下切过程中发育底部滞留沉积,厚度通常在几十厘米到几米。根据内部岩性差异,地震振幅特征上也有一定响应。在限制性沉积阶段,底部滞留沉积产物可以分为以下几种岩相类型。

1) 粗砂及复合砂体

为最典型的滞留沉积物,主要由大量分选较差、成层性较差且厚度变化较大(3~8 m)的砾石组成(图3a)。常常可能在水道底部成层,但由于局部水道下切影响,厚度会呈现不规则的迅速变厚或变薄^[14-18]。水道砂体受压实程度较弱影响往往呈现出低阻抗特征,而滞留沉积往往是高密度的砾石组成,往往呈现出高阻抗特征。基于此可以作为地震识别滞留沉积的重要反射特征。滞留沉积的储层质量差异较大,但由于组成的碎屑颗粒粒径较大,存在高渗透的可能性,可作为潜在的渗流通道。

2) 泥质碎屑复合体

属于滞留沉积常见产物,源于层内砂质背景下的泥质碎屑沉积,在水道下切过程中从水道底部和侧翼

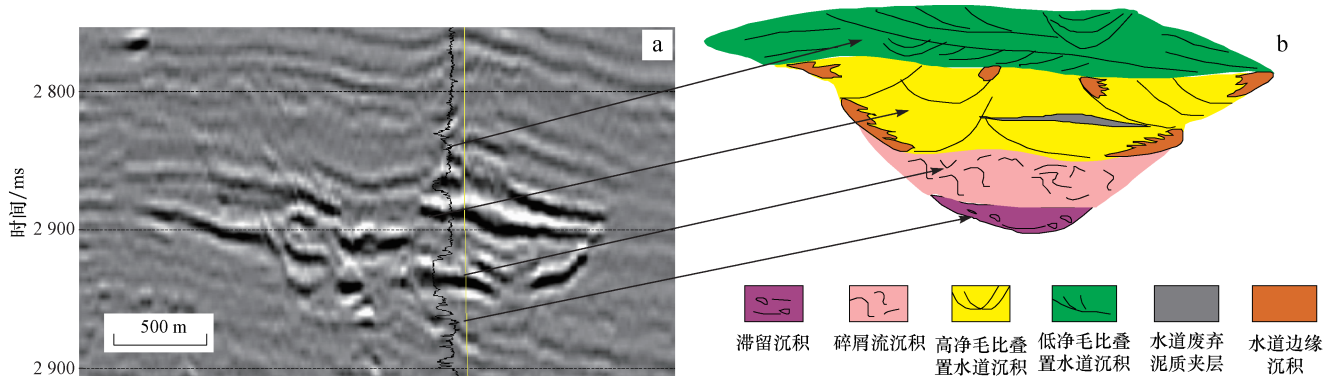


图2 浊积水道砂岩构型要素分类及相应地震反射特征

Fig. 2 Categorization of sandstone architecture elements in turbidite channels and the corresponding seismic features

a. 浊积水道体系地震反射特征; b. 水道体系内构型要素分类

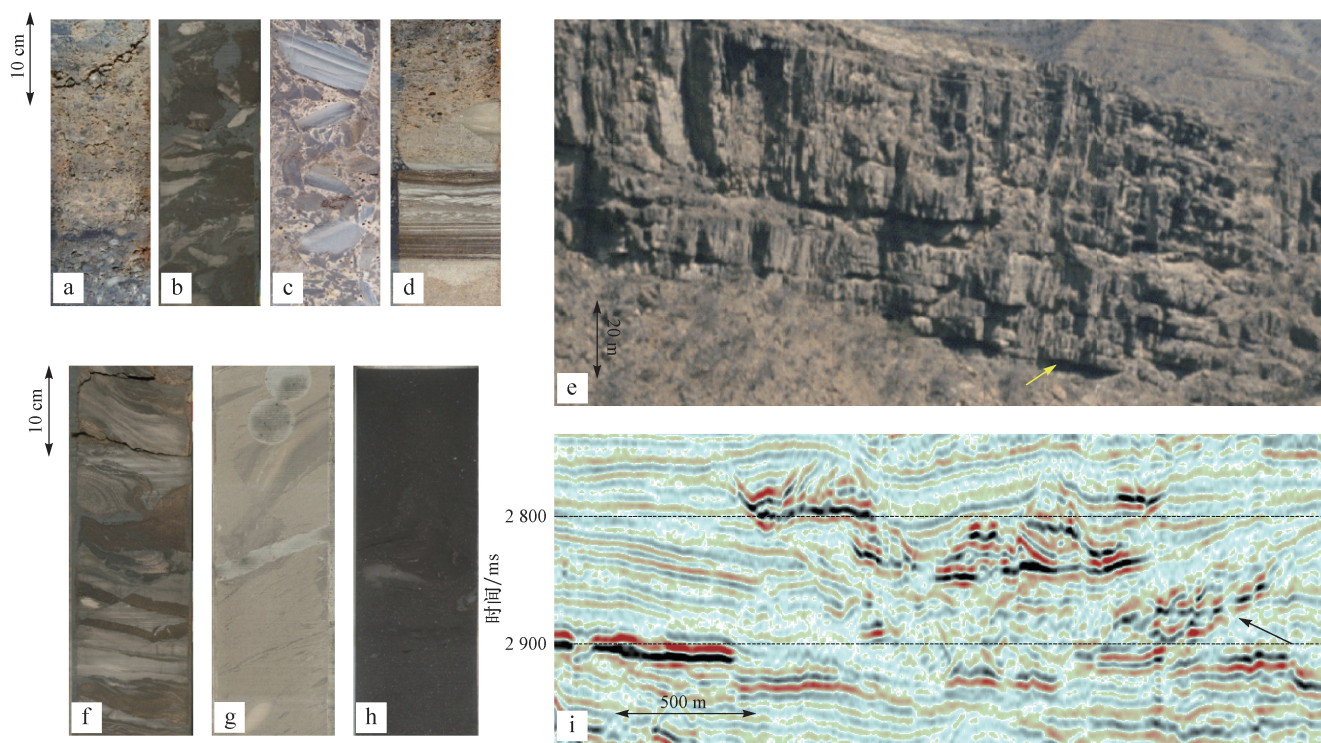


图3 底部滞留及滑塌碎屑流主要沉积物类型及特征

Fig. 3 Categories and characteristics of bottom lag deposits and slump debris flow deposits in the channel

a. 粗砂及砾石; b, c. 泥质碎屑(含泥砾)沉积; d. 泥质碎屑沉积(野外露头); e. 水道下切泥质层残余(可能会成为夹层); f. 滑塌沉积; g. 沙泥混合内碎屑; h. 泥质碎屑(含小砾石); i. 近邻水道滑塌沉积(图中箭头所示)

滑塌形成(图3b,c)。泥质碎屑的胶结程度各异,对于泥质含量较高的致密层往往会形成致密遮挡层。另外,在一些水道底部可能存在一套几米厚的泥质碎屑胶结层,可能宽度仅有几十米,但在内部很有可能形成一套弱连通层。

3) 泥质层

水道底部滞留沉积的主要沉积物,源于先期半深海泥岩或水道废弃部分在后期水道下切过程中的残留^[19],在岩心和野外露头有比较好的描述结果(图3d,e)。这些泥质隔夹层是很重要的渗流隔挡层。

基于以上不同滞留沉积物的特征,说明这些沉积物有可能成为开发上的高渗层(粗砂或复合砂体),也可能成为隔挡层(泥质碎屑沉积或泥质隔夹层)。以上滞留沉积物中,只有砾质砂岩复合体在地震上具有识别的可能性。因此,在浊积水道储层建模过程中,识别水道底部不同岩性特征至关重要。

2.2 滑塌碎屑流沉积

水道沉积均含有碎屑流产物,规模从几分米到几十米不等。碎屑流由许多复杂的流体过程混合在一起,其中包括滑塌、内碎屑及非稳态流^[19-21](图3f—h)。有

一些滑塌沉积明显来自于邻近水道砂体(图3i),然而绝大部分还是来源于远距离上游沉积物的搬运,如滑塌碎屑流的产物包含较多粒度更粗,水道沉积物之外的一些碎屑颗粒(图3f)。碎屑流在低位域早期沉积中比较常见,但是在中期也会见到。地震剖面上表现为中-强振幅,中等-差连续性反射,然而有时在地震上往往与较厚的高密度砂质沉积不易区分。总之,碎屑流沉积包括泥岩、泥质砂岩和较纯砂岩,且其形态扭曲各异,常常很难形成有效储层,尤其对于含油层来说,该类砂体有可能成为渗流屏障。

2.3 高净毛比叠置水道砂体

从储层研究的角度考虑,高净毛比的叠置水道沉积是最主要的油气储层类型^[21]。主要由一系列叠置复合砂体构成,厚度在1~10 m,宽度在100~500 m,在品质较高的地震资料上能够从振幅属性上进行识别,主要由大量高密度浊流沉积构成,多数体现为鲍马序列的a段和b段(图4a,b),薄层的泥质碎屑以及粗粒的滑塌沉积标志浊积水道的底部。一些水道呈现出向上变薄、变细的Tc和Td甚至顶部的半远洋细粒沉积,在单一水道的顶部得以保存(图4c)。地震反射特征上可以发现(图4d),水道主体部位复合砂体以中连续性、

中-强振幅反射为主,水道两侧边部则由于泥质含量增加、厚度减薄,地震反射呈现较好连续性、中-弱振幅反射。此外,限制性水道体系内部集中叠置的水道砂体,明显的呈现出“水道主线控制”和“水道边缘控制”的水道充填结构,且水道边缘以泥质充填为主,“水道主体”与“水道边缘”压实程度差异较大,厚度存在明显不同(图4d)。在该种模式下,较容易识别和预测优质储层分布位置。

在限制性下切水道体系内部,高净毛比的砂体是最有利储层,净毛比($N:G$)在 $0.4 \sim 0.7$,尽管在内部或边部会多少保留一些泥质夹层,但整体连通性较好。

然而,在实际地下储层中,最大难题是如何通过地震资料将其与滑塌碎屑流沉积物进行区分。当储层净毛比较高的时候,地震反射很难反映出内部单一水道界限,仅能反映出水道体系内存在一些弱反射或不

连续性反射,这种反射特征与滑塌碎屑流沉积很相似。此外,受古地形影响,碎屑流在沉积过程中也会存在差异压实现象。以上种种现象均导致两者区分难度变大。

2.4 低净毛比天然堤型水道砂体

在大型下切水道体系沉积的末期,往往较发育高弯曲度天然堤型水道沉积^[22](图4e,f)。这期水道沉积往往会溢出原有下切谷(图4e),厚度较薄一般在10 m左右,宽度50~100 m,地震属性切片上能够清晰看到水道形态,但天然堤不太发育(图4e);而另外一些情况,这些末期水道受天然堤控制作用明显,宽度有300 m左右,厚度达几十米,天然堤呈嵌入式分布在水道主体左右,沉积体以泥质或低净毛比的砂体以及天然堤为主,内部夹杂零星的薄层砂体(图4f)。该类构

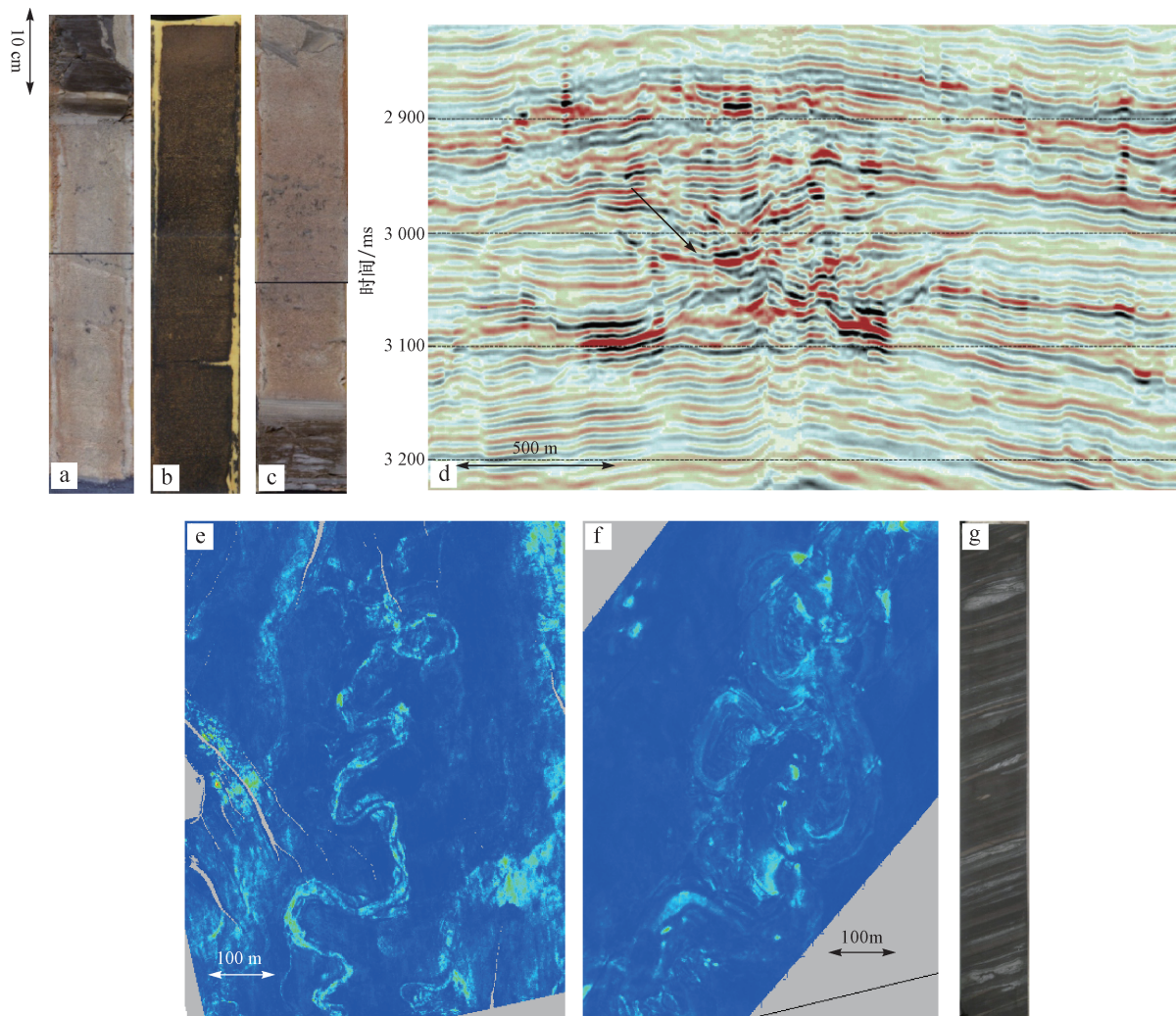


图4 高净毛比和低净毛比水道沉积岩心及地震响应特征

Fig. 4 Sedimentary core features and seismic responses of channels with high NTG and low NTG

a. 块状层理中砂岩;b. 块状层理粗砂岩;c. 下部为鲍马序列的波状层理细粒沉积,向上突变接触为新一期鲍马序列;d. 叠置水道主体呈现强振幅反射,边部振幅逐渐减弱(图中箭头所示);e. 高弯曲水道(不发育天然堤);f. 高弯曲水道(发育天然堤);g. 细砂岩中夹杂泥质薄层

型要素主要沉积在水道顶部,以砂泥薄互层为主(图4g),占据了储层一定比例。

3 浊积水道构型建模

在厘定浊积水道构型要素分类基础之上,开展三维空间的分布模拟是将研究成果应用到生产实践的重要过程。按照层次建模的思路,首先进行浊积水道目标体建模,在此基础上开展内部岩相的分布模拟。

3.1 浊积水道构型模式

下切型水道体系内部的形成和演化是一个长期的过程,水道周期性的下切-充填是大型水道形成的重要基础,其中最重要的是单一水道间的反复切割与充填。现今同一位置处的水道沉积现象,可能是多期次单一水道相互切割-充填的最终结果^[23]。精细表征这一形成过程是评价大型浊积水道储层的必要步骤,在高频地震资料上能够较为清晰的识别这种叠置模式,且通过这种构型模式的指导,能够通过一些不连续

地震相特征,在井标定的情况下进行有针对性的地质解释。

关于水道叠置模式前人有过很多研究^[24],垂向叠置模式取决于侵蚀充填程度及最终保留结果,侧向叠置可能沿着同一方向(图5b)或沿着古水道位置左右摆动(图5a)。总之,两种叠置模式经常同时出现,可能以垂向为主(图5d),也可能以侧向为主(图5c)。此外,水道叠置模式在较短距离内就会发生变化(图5),因此,相对应的地质模型也不能仅仅对应于一种砂体叠置模式。

此外,无论是复合水道还是单一水道,水道的主体到边部均会发生岩性变化,且沉积厚度也会逐渐减薄,因此,将从平面分布位置上将其划分为水道主体、水道边部两部分(图6)。但两部分之间的界限并无明确划分的标准,水道主体和边部之间的比例依据水道沉积结果的不同处于变化之中,存在一定的不确定性。

前面在水道构型分析过程中认识到,水道主体和水道边部岩性差异明显,两者共同构成了完整的水道目标体。水道主体除底部含有少量砾岩及碎屑流沉积

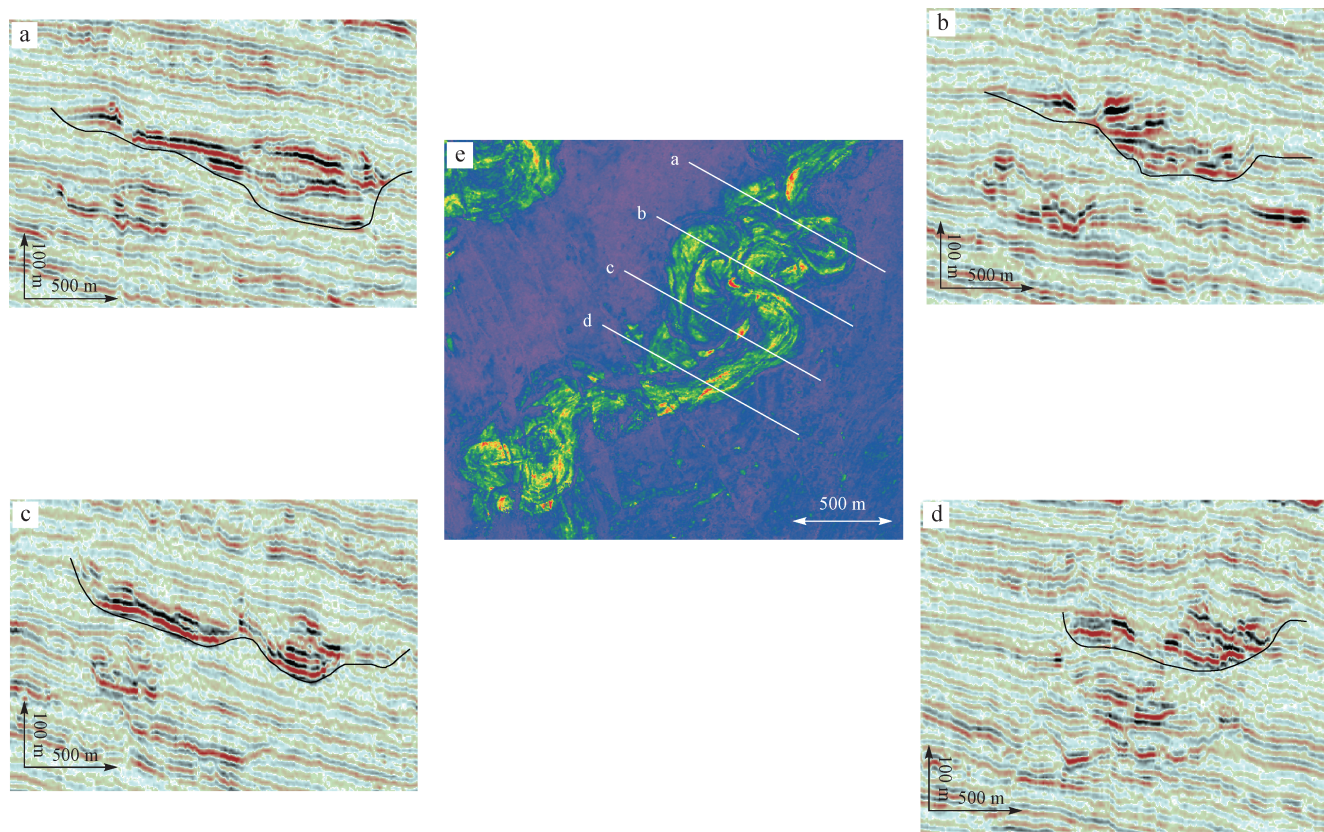


图5 水道不同部位的叠置模式变化迅速

Fig. 5 Rapid change in superposition patterns for different parts of the channel

a. 沿古水道方向左右摆动; b. 沿着同一方向摆动; c. 侧向迁移叠置为主; d. 垂向叠置为主; e. 高弯曲水道

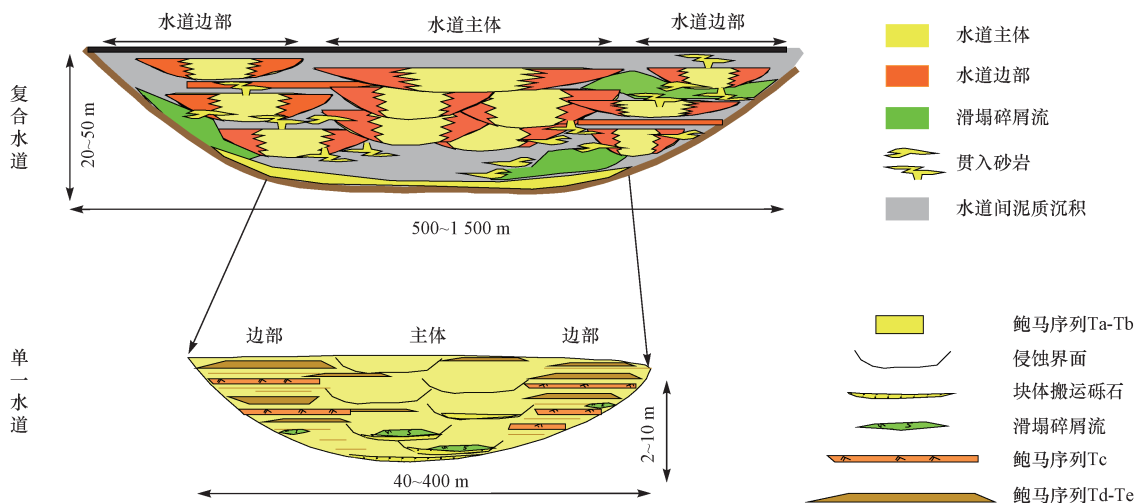


图6 水道内部层次结构及岩相差异

Fig. 6 Layered structure and lithofacies differences in the channel

外,主要以大套块状中粗砂岩为主,体现为鲍马序列的Ta和Tb段,偶有薄泥岩夹层;水道边部砂体逐渐减薄,泥质含量增加,多数体现为鲍马序列的Tc、Td和Te段(图6)。

每一期单一水道内部的充填序列都会存在一定差异^[24]。如果一期水道内部充填物以泥质滑塌或碎屑流为主,那么与上一期下切剩余沉积产物之间就会相互独立,而且,该种沉积关系很难在地震资料上识别,会对储量计算及井网优化带来负面影响。

3.2 水道级别三维模拟

水道级别的建模是浊积岩储层建模的基础。本次建模研究,选取位于西非安哥拉地区的某油田区块,目标层位为新近系渐新统,为典型的浊积水道沉积,当前有钻井4口,取心资料近150 m。

水道级别模拟主要采用基于目标的模拟方法,根据笔者前期总结的西非地区浊积水道相关规模参数^[25],定义单一水道的长、宽、厚及弯曲度范围,同时在模拟过程中通过水道主流线生成水道叠置模式,作为浊积水道三维模拟的软约束条件。

前面提到,完整的水道单元包含水道主体和水道边部,且水道主体和边部之间的界限位置存在不确定性。因此,本次模拟过程为评估不同比例对模拟结果的影响,将水道主体:边部设置为70%:30%作为基础方案,另外分别设置60%:40%和80%:20%作为敏感性分析方案。基于RMS地质建模软件,以单井解释构型要素及岩相结果作为条件数据(图7),采用较为成熟的基于目标模拟的方法,在参数设置基础上进行三维水道分布模拟,从模拟结果(图8)来看,不同比

例的初始值对结果影响较大,尤其对比图8a与图8c,水道主体和边部的不同比例均得到较好的体现。从模拟结果的三维结构来看,水道之间的叠置关系也符合前期分析的构型模式,达到了参数控制和模式约束的预期效果。该模拟结果可以作为下一步三维构型模拟的基础。

3.3 水道内部构型模拟

前已述及,单一水道内部构型要素大类划分为4种(图2),但根据每种大类内部比较典型的岩性特征,又在岩心识别划分的基础上进行了细化(图6)。本次构型模拟的基础数据来自多口井的岩心分析,统计了每种岩相的比例,在单一水道不同比例(水道主体:边部)模型的约束下,采用截断高斯模拟方法模拟浊积水道岩相三维分布。截断高斯模拟能够较为真实的反映岩相的沉积序列,从三维分布结果(图9)来看,受不同水道类型(主体:边部比例不同)约束影响,岩相分布呈现出明显差异,图9c中鲍马序列Ta/Tb段高密度浊流沉积比例较高,属于高净毛比浊积砂体;而图9a中由于水道边部比例相对较高,多表现为废弃的泥质沉积和边部滑塌沉积。

另外,为充分印证构型模拟结果的可靠性,选取基础参考模型(70%:30%)进行横截面分析。从剖面分析结果来看,垂物源方向(图10a)水道内部从底部到顶部,体现为砾岩沉积—中粗粒的鲍马序列Ta—Tb—中细粒的Tc段—泥质碎屑或细粒泥质沉积的正旋回序列,且单一水道之间的叠置关系(斜列、垂向叠置等)明显;从平行水道沉积方向(图10b)看,水道内部的正粒序特征明显,砂体的连续性增强,受水

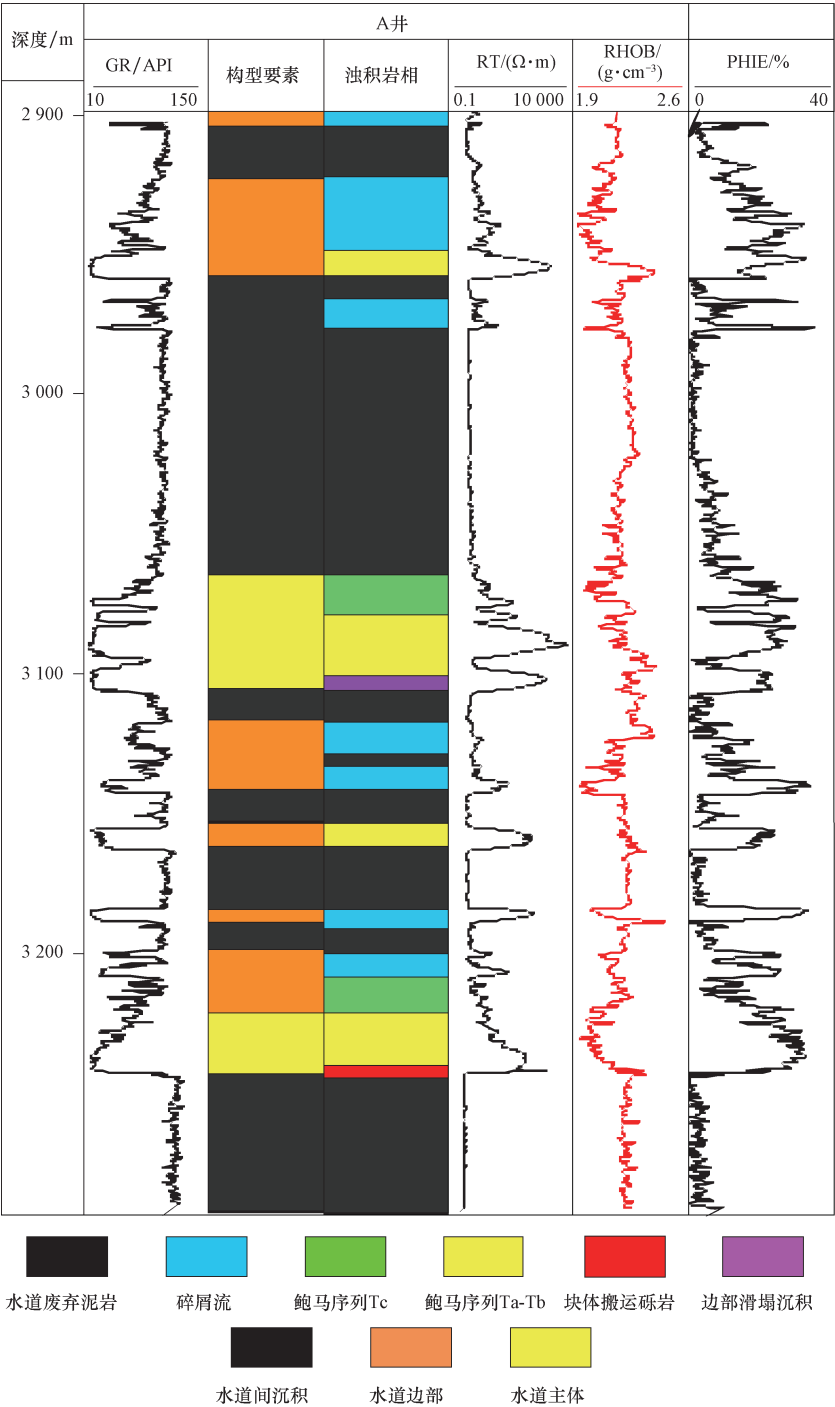


图 7 A 井浊积水道构型要素及岩相解释结果

Fig. 7 Turbidity channel architecture elements and lithofacies interpretation in Well A

道弯曲程度影响,截面位置依然能看到完整的单一水道形态。

4 结论

1) 水道内部充填的岩相类型可以总结为 4 大类。每种相类型基本可以从中 - 高品质的地震资料中识别。包括①粗粒底部滞留沉积,泥质碎屑岩复合体及

泥质隔板;②滑塌及碎屑流,来自于临近水道砂体的垮塌或远距离搬运;③高净毛比的叠置水道砂体,属于品质最好的储层;④低静毛比弯曲型天然堤型 - 水道,甚至溢出水道下切位置形成席状砂。此外,一些泥质夹层以及高位域时期的细粒沉积也是水道充填的重要组成部分。

2) 周期性水道反复下切及充填,形成了复杂的构型或层序界面,产生现今复杂水道体系沉积结果,水道

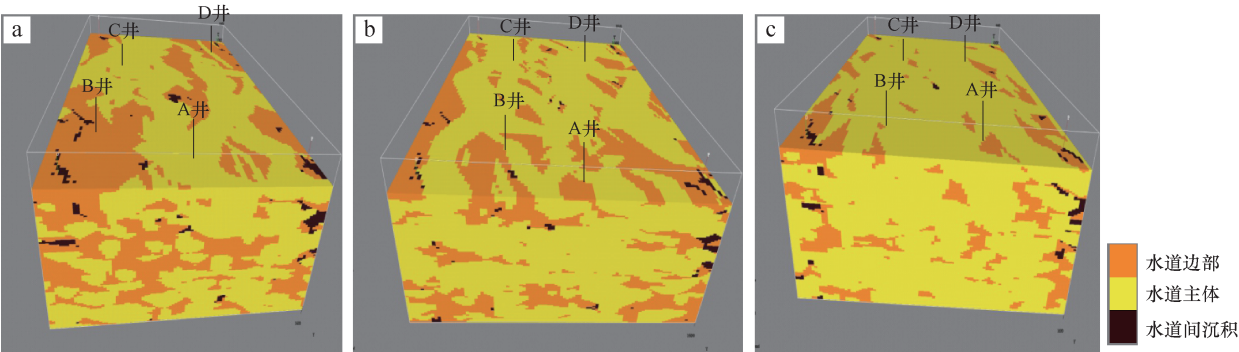


图 8 水道主体 - 边部不同比例下浊积水道三维模拟结果

Fig. 8 3D simulations of turbidity channel with different body-margin ratios of the channel

a. 60 % : 40 %; b. 70 % : 30 %; c. 80 % : 20 %

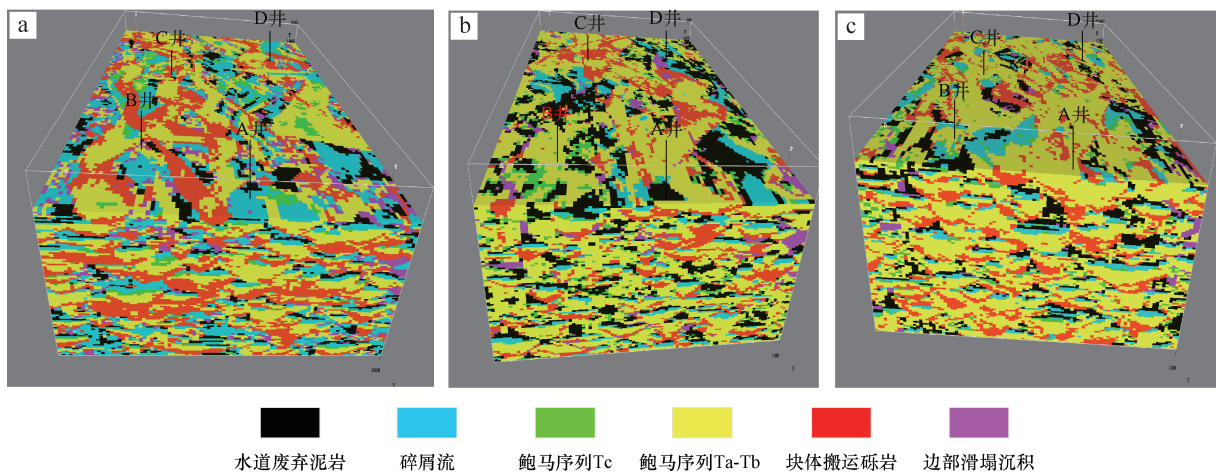


图 9 水道主体 - 边部不同比例下岩相三维模拟结果

Fig. 9 3D simulations of lithofacies with different body-margin ratios of the channel

a. 60 % : 40 %; b. 70 % : 30 %; c. 80 % : 20 %

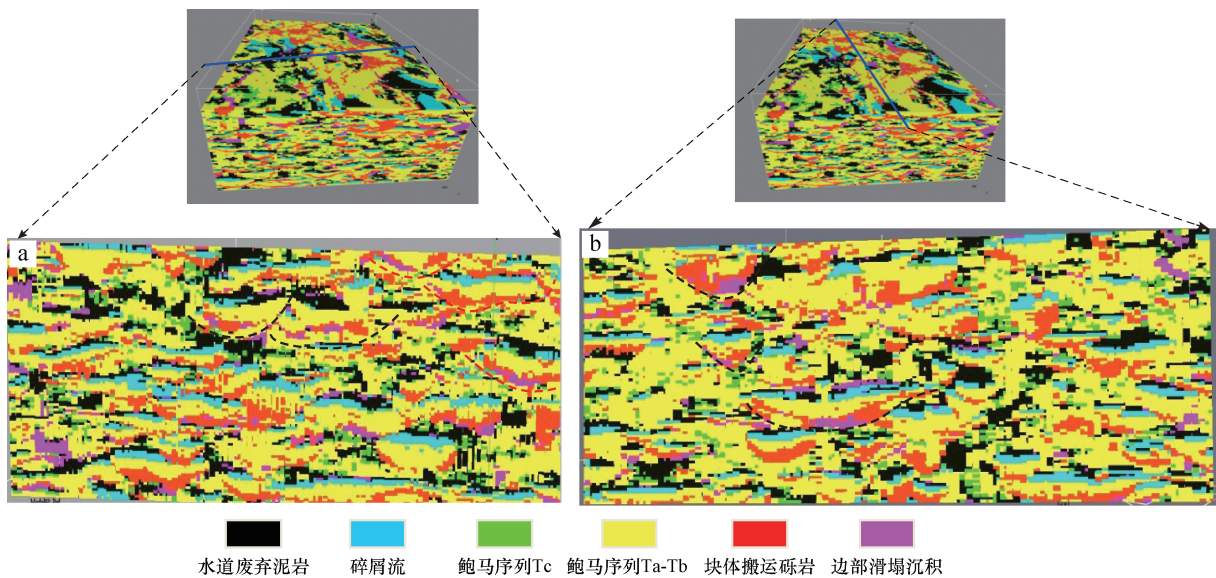


图 10 水道主体 - 边部 70 % : 30 % 比例下岩相模拟剖面结果

Fig. 10 Profile showing the lithofacies simulation with a body-margin ratio of 70 % : 30 %

a. 垂直物源方向; b. 平行物源方向

叠置样式包括侧向为主、垂向为主以及侧向-垂向间的过渡类型,沿水道走向方向,水道叠置样式变化较快。

3) 三维构型模式约束下,浊积水道岩相模拟结果符合其沉积规律。从三维空间的砂体形态及比例、不同方向剖面上岩性接触关系,均体现了岩相变化的韵律性及相控约束的特点。

4) 水道砂体的叠置样式关系到开发井网的设计。认清砂体的岩性变化、韵律特征及切割关系,对于开发井网方向和位置的设计至关重要。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Adeogba A A, Mchargue T R, Graham S A. Transient fan architecture and depositional controls from near-surface 3-D data, Niger Delta continental slope[J]. *AAPG Bulletin*, 2005, 89(5): 627-643.
- [3] Babonneau N, Savoye B, Cremer M, et al. Morphology and architecture of the present canyon and channel system of the Zaire deep-sea fan[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2002, 19(4): 445-467.
- [4] Beydoun W. Benefits of a 3DHR survey for Girassol Field appraisal and development, Angola[J]. *Leading Edge*, 2002, 21(11): 1152-1155.
- [5] Shanmugam G. The Bouma Sequence and the turbidite mind set[J]. *Earth-Science Reviews*, 1997, 42(4): 201-229.
- [6] Browne G H, Slatt R. M. Outcrop characterization of a late Miocene slope fan system, Mt. Messenger Formation, New Zealand[J]. *AAPG Bulletin*, 2002, 86(5): 841-862.
- [7] Busby C J, Camacho H, Kneller B. A new model for the Miocene-Pliocene turbidite system at San Clemente, CA (abs.) [J]. *AAPG Bulletin*, 1998, 82.
- [8] Clark J D, Gardiner A R. Outcrop analogues for deep-water channels and levee genetic units from the Gres d'Annot turbidite system, SE France[J]. *Gessep Proceedings*, 2000: 175-189.
- [9] Das H S, Imran J, Pirmez C, et al. Numerical modeling of flow and bed evolution in meandering submarine channels[J]. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 2004, 109(C10).
- [10] Deptuck M E, Steffens G S, Barton M, et al. Architecture and evolution of upper fan channel-belts on the Niger Delta slope and in the Arabian Sea[J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2003, 20(6): 649-676.
- [11] Fonnesu F. 3D seismic images of a low-sinuosity slope channel and related depositional lobe (West Africa deep-offshore) [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2003, 20(6): 615-629.
- [12] Houghton P D W. Evolving turbidite systems on a deforming basin floor, Tabernas, SE Spain [J]. *Sedimentology*, 2010, 47(3): 497-518.
- [13] Hickson T A, Lowe D R. Facies architecture of a submarine fan channel - levee complex: the Juniper Ridge Conglomerate, Coalinga, California [J]. *Sedimentology*, 2010, 49(2): 335-362.
- [14] Kendrick J W. Turbidite reservoir architecture in the northern Gulf of Mexico deepwater: Insights from the development of Auger, Tahoe, and Ram/Powell Fields [M]. *Deep-Water Reservoirs of the World: 20th Annual*. 2000: 450-468.
- [15] Kneller B. The influence of flow parameters on turbidite slope channel architecture [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2003, 20(6): 901-910.
- [16] Lin Yu, Wu Shenghe, Wang Xing, et al. Composite sand bodies architecture of deep-water turbidite channels in the Niger Delta Basin [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2014, 88(5): 1801-1803.
- [17] Michael H G, James M B, Jesse J M, et al. Stratigraphic process-response model for submarine channels and related features from studies of Permian Brushy Canyon outcrops, West Texas [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2004, 20(6): 757-787.
- [18] Mayall M, Stewart I. The architecture of turbidite slope channels [M]. *Deep-Water Reservoirs of the World: 20th Annual*. 2000: 578-586.
- [19] Mayall M, Jones E, Casey M. Turbidite channel reservoirs-Key elements in facies prediction and effective development [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2006, 23(8): 821-841.
- [20] Peakall, J, McCaffrey, B, Kneller, B. A process model for the evolution, morphology, and architecture of sinuous submarine channels [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2000, 70(3): 434-448.
- [21] Posamentier H W. Depositional elements associated with a basin floor channel-levee system: case study from the Gulf of Mexico [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2003, 20(6): 677-690.
- [22] Thierry M, James P M, Syvitski S M, et al. Marine hyperpycnal flows: initiation, behavior and related deposits. A review [J]. *Marine & Petroleum Geology*, 2003, 20(6): 861-882.
- [23] 赵晓明, 吴胜和, 刘丽. 西非陆坡区深水复合水道沉积构型模式 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2012, 36(6): 1-5, 12.
Zhao Xiaoming, Wu Shenghe, Liu Li. Sedimentary architecture model of deep-water channel complexes in slope area of West Africa [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2012, 36(6): 1-5, 12.
- [24] 林煜, 吴胜和, 王星, 等. 深水浊积水道体系构型模式研究——以西非尼日尔三角洲盆地某深水研究区为例 [J]. *地质论评*, 2013, 59(3): 510-520.
Lin Yu, Wu Shenghe, Wang Xing, et al. Research on architecture model of deepwater turbidity channel system: A case study of a deep-water research area in Niger Delta Basin, West Africa [J]. *Geological Review*, 2013, 59(3): 510-520.
- [25] 张文彪, 刘志强, 陈志海, 等. 安哥拉深水水道地质知识库建立及应用 [J]. *沉积学报*, 2015, 33(1): 142-152.
Zhang Wenbiao, Liu Zhiqiang, Chen Zhihai, et al. Establishment and application of geological data base on deep-water channels in Angola [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(1): 142-152.

(编辑 张玉银)