

深水水道沉积内幕级次划分与精细刻画

李东伟^{1,2}, 龚承林^{1,2}, 胡林³, 何小胡³, 罗泉源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. 中海石油(中国)有限公司 海南分公司, 海南 海口 570100]

摘要:深水水道是一类重要的深水油气储集体,因其沉积过程复杂、沉积相带多变,亟待建立一种深水水道沉积内幕的级次划分与精细刻画方法。基于不同深水水道的发育特点,提出了一套基于三维地震资料刻画评价深水水道沉积内幕级次的方法。当待评价深水水道发育、可见水道复合体系底界面时,可采用“三界-六相带”沉积内幕解析方法,即依据3类地质界面(水道沉积体系底界面、水道复合体系底界面和沉积相带分界面)将这类深水水道划分为6个沉积相带(底部滞留、轴部充填、轴部侧翼沉积、滑塌碎屑流沉积、天然堤和水道泥)。当拟评价深水水道不发育、可见水道复合体系底界面时,可采用“两界面-两相带”沉积内幕解析方法,即依据2类地质界面(水道沉积体系底界面和天然堤顶、底界面)将这类深水水道划分为2个沉积相带(水道充填和天然堤)。其中,“六相带”中的底部滞留和轴部充填以及“两相带”中的水道充填可形成优质油气储集体,其富砂性可依据它们的顶凸程度来辨别(当发育可见的顶凸地震反射外形时相对富砂,反之则相对富泥)。利用“三界-六相带”法和“两界面-两相带”法对琼东南盆地某深水水道进行解剖,结果发现它们可以较好地对深水水道沉积内幕进行级次划分与精细刻画,表明该方法在其他地区也具备实用性,具有一定的工业应用前景。

关键词:地质界面;沉积相带;精细刻画;级次划分;沉积内幕;油气储集体;深水水道;琼东南盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Hierarchical division and fine architectural depiction of the interior of deep-water channel deposits

LI Dongwei¹, GONG Chenglin^{1,2}, HU Lin³, HE Xiaohu³, LUO Quanyuan³

[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. Hainan Branch of CNOOC, Haikou, Hainan 570100, China]

Abstract: Deep-water channel deposits are of an important type of deep-water hydrocarbon reservoirs. Given their complicated depositional processes and variable facies, it is urgent to establish a method for the hierarchy division and fine architectural depiction of the interior of deep-water channel deposits. The study proposes an efficient method to characterize and evaluate the interior hierarchy of deep-water channel deposits by using seismic data while considering the characteristics of diverse deep-water channel deposits. If the bottom boundary of seismically resolvable channel-complex set is recognized, the methodology of “three boundaries plus six facies belts” can be applied to hierarchical division and fine architectural depiction of the interior of deep-water channel deposits. According to three types of geological interfaces (i. e., the bottom boundary of channel sedimentation system, the bottom boundary of channel-complex set, and the interface of sedimentary facies belts), six facies belts (including basal lags, axial fills, marginal fills, slumps and debris flows, levee, turbidite mud) can be delineated in this type of deep-water channels. While, if not, the methodology of “two boundaries plus two facies belts” can be used, where two facies belts (i. e. channel fills and levee) can be delineated by two kinds of boundaries (i. e. bottom boundary of channel sedimentation system and boundary of levee) in this type of deep-water channel deposits. “Basal lags and axial fills of the six facies belts” and

收稿日期:2023-02-04;修订日期:2023-04-01。

第一作者简介:李东伟(1997—),男,博士研究生,深水沉积学与层序地层学。E-mail: dongweilip2p@hotmail.com。

通讯作者简介:龚承林(1983—),男,教授、博士生导师,地震解释、深水沉积与层序地层。E-mail: chenglingong@cup.edu.cn。

“channel fills of the two facies belts”, among others, could have quality reservoirs developed, the sand-rich property of which can be recognized by top convexity (that is, relatively sand-rich property indicated when the top convex seismic reflection is visible, and relatively mud-rich property when this is invisible). Applying the methodology of “three boundaries plus six facies belts” and “two boundaries plus two facies belts” in the investigation of the deep-water channel deposits in the Qiongdongnan Basin, we can conclude that it could better achieve the hierarchical division and architectural depiction of the interior of deep-water channel deposits. This also shows that the methodology can be applied to deep-water channel deposits in other regions, and is promising in industrial application.

Key words: geological interface, sedimentary facies belt, fine depiction, hierarchical division, interior of deposits, hydrocarbon reservoir, deep-water channel, Qiongdongnan Basin

引用格式:李东伟,龚承林,胡林,等.深水水道沉积内幕级次划分与精细刻画[J].石油与天然气地质,2023,44(3):553-564. DOI:10.11743/ogg20230303.

LI Dongwei, GONG Chenglin, HU Lin, et al. Hierarchical division and fine architectural depiction of the interior of deep-water channel deposits [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(3): 553-564. DOI: 10.11743/ogg20230303.

深水水道(重力流水道)是沉积物自浅水陆架/上陆坡向深海中搬运输送形成的通道,是重要的深水油气储集体单元(图1a),自20世纪90年代以来伴随着深水油气勘探一直受到国内外研究学者的广泛关注^[1-8]。据不完全统计,海洋深水碎屑岩中所蕴含的油气储量超过90%来自深海水道(水道砂)和末端朵叶(席状砂)^[9]。

经过多年的研究,学者们对水道类型、沉积特征、过程演化、沉积模式和成因机制等方面的认识都有了长足的进步^[3-7,10-16]。因受控于海平面变化、沉积物供给变化、深海中其他沉积过程(如等深流)等多种地质因素的综合作用,深水水道往往具有复杂多变的沉积内幕(如沉积相带和发育级次等)^[3,5,11,17-19]。不同的学者利用不同的研究资料(如岩心、露头、测井和地震等)、基于不同的研究目的,对深水水道的发育级次进行识别和划分,并对其沉积相带进行精细表征^[3,20]。Mayall等(2006)^[3]研究认为:一个水道沉积体系的底界面相当于三级层序界面,内部水道复合体和单期水道分别以四级和五级界面为界;利用这3种级次的地质界面可有效地进行水道沉积内幕的级次划分。Sylvester等(2011)^[21],Jobe等(2016)^[22]和Gong等(2021)^[6]提出了基于水道生长/迁移轨迹的沉积内幕刻画方法,认为:侧向生长、无序生长和垂向生长的水道迁移轨迹分别是侧向迁移、无序迁移和垂向加积水道叠置样式的“代言人”。此外,学者们也提出了地质体、水道单元和水道带等术语概念来描述水道的相带单元,然而不同学者往往会采用不同的术语概念来描述同一水沉积道单元^[3,20,23-25]。

尽管上述研究为沉积内幕解剖提供了有益的参考和借鉴^[3,21],但水道沉积内幕的级次划分与精细刻画仍然被认为是当前深水水道研究所面临的重要挑战之一^[6,22]。譬如,针对同一水道相带单元,不同的学者可

能会以不同的术语进行命名;因所利用资料手段的差异,同一水道可能会被划分为不同的发育级次^[3,5-6,22]。因而,亟待建立一种水道沉积内幕的级次划分与精细刻画方法,以实现水道沉积构成和发育级次的合理划分与精细刻画。

本文基于地震资料,依据不同类型的水道,分别采用“三界-六相带”法和“两界面-两相带”法进行了水道沉积内幕的级次划分与精细刻画。该方法在琼东南盆地晚中新世深水水道中得到了较好的运用,对其他地区深水水道沉积内幕的级次划分与精细刻画也具备实用性,具有一定的工业应用前景。

1 深水水道沉积内幕级次单元

综合前人对深水水道级次划分与精细刻画的研究成果,深水水道可发育8个级次的沉积内幕,按研究精度由高到底、内幕级次由小到大依次为:纹层、浊积层、浊积层组、水道充填单元、单期水道充填、水道复合体、水道复合体系(CCS)和水道沉积体系(图1b)^[3,20,25-27]。

1.1 纹层

纹层是浊流沉积中肉眼可见的最小级次单元,其延伸范围小、形成时间短、成分和结构较均匀,厚度一般只有数毫米;通常只可通过岩心及野外露头进行观察分析,单纹层内部不可识别沉积微构造等特征(图1b)^[28]。

1.2 浊积层

浊积层是深水浊流沉积的基本单元,由一系列有成因关联的纹层组成(纹层组),代表短时间内的单个浊流沉积事件;相当于一个递变粒序层理鲍马序列

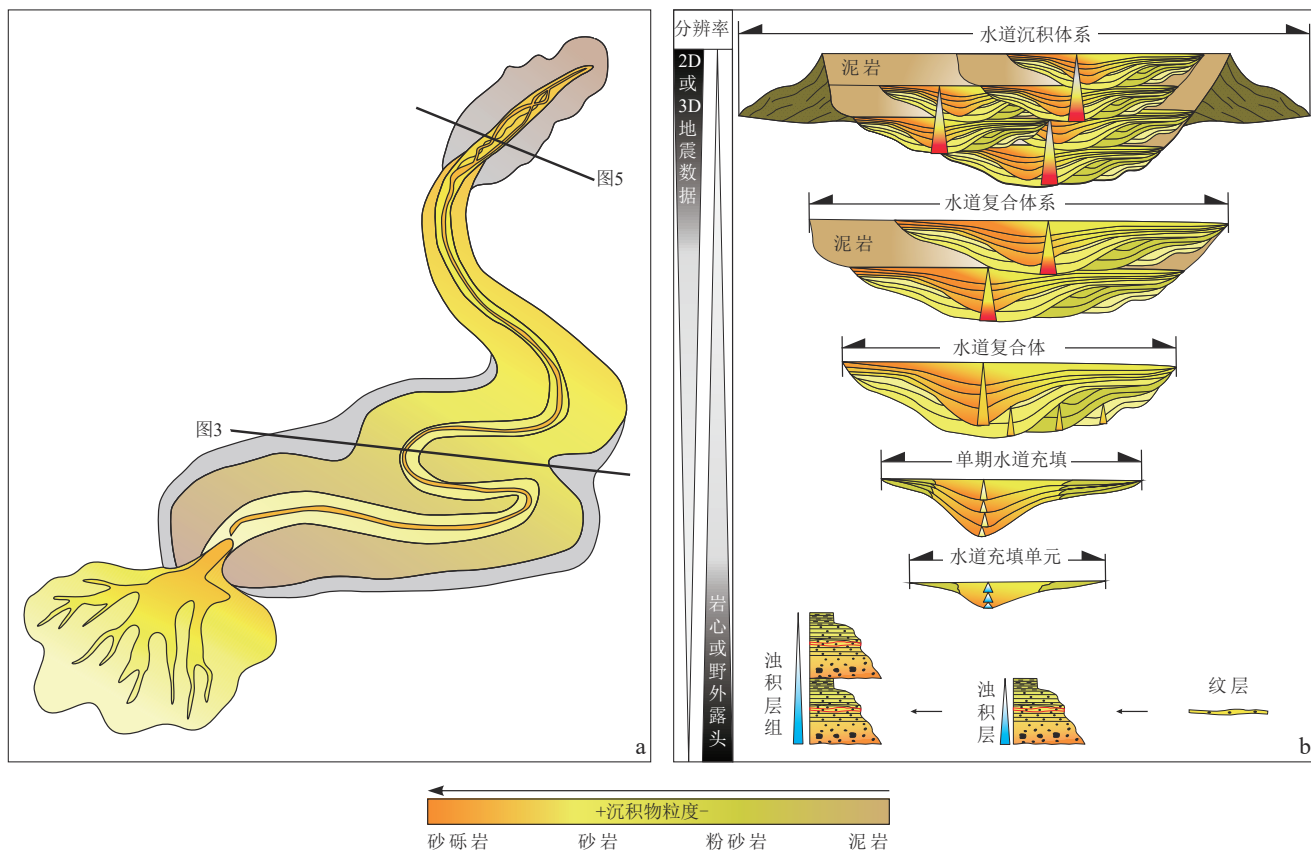


图1 深水水道及其沉积内幕的级次单元示意图

Fig. 1 Schematic illustration of deep-water channels and the associated sedimentary hierarchy

a. 深水水道沉积体系平面展布; b. 水道内幕级次单元剖面特征

(图1b)^[29]。一个浊积层的厚度在几厘米到十几厘米不等,往往由5个连续沉积层段组成(Ta, Tb, Tc, Td和Te);可通过岩心及野外露头资料对其进行有效识别及刻画(图1b)^[20,25]。理想的单期浊流沉积包括了整个鲍马浊流层序,下粗上细,其中Ta—Tc段可作优质油气储集体。

1.3 浊积层组

浊积层组由一系列有成因关联的浊积层组成,包括两个及以上具有递变粒序层理鲍马序列(图1b)^[29]。一个浊积层组的厚度往往小于1 m,可通过岩心及野外露头资料进行有效识别及刻画,在小区域内进行对比分析(图1b)^[20,25]。

1.4 水道充填单元

水道充填单元是构成“单期水道充填”的基本单元,是单期水道充填内部具有侵蚀底面的充填单元(图1b)^[27]。水道充填单元往往具有U型或V型的剖面形态,可以区分出轴部和边缘两个相带;而前已述及的“纹层、浊积层、浊积层组”往往无法识别该剖面形态(图1b)。水道充填单元往往由多个具有一定成因关

联的浊积层组构成,厚约数米,可通过岩心及野外露头资料进行刻画表征^[8]。

1.5 单期水道充填

单期水道充填由一系列具成因关联的水道充填单元构成,可见顶平底凸的剖面形态;且剖面规模比水道充填单元更大,发育可见的轴部、轴部侧翼和边缘3个相带(图1b)。单期水道充填一般厚约十余米,垂向上表现为由多个递变粒序浊积层组构成的正旋回;其往往易于被测井资料所识别刻画,而仅有连续长约十余米的岩心资料或野外露头方可用于刻画表征单期水道充填(图1b)^[27]。

1.6 水道复合体

水道复合体由两个及以上、具有相同构型样式的单期水道充填侧向迁移和垂向加积叠置而成(图1b)^[27]。水道复合体的厚度从十余米到几十米不等,在地震剖面上往往表现为局部小规模侵蚀下切,这些侵蚀下切面难以利用地震资料进行区域追踪对比;其往往易于被测井资料所识别,而岩心资料或野外

露头则不再用于刻画水道复合体(图1b)。

1.7 水道复合体系

水道复合体系由两个及以上、同一水道充填期的多期水道复合体侧向迁移和垂向加积叠置而成,而后被水道废弃形成的泥岩所披覆(图1b)^[27]。水道复合体系的厚度从百余米到数百米不等、宽度从数百米到数千米不一,其在地震剖面上往往表现出大规模的侵蚀下切特征,这些底部侵蚀下切面常常可以利用地震资料进行区域等时追踪对比^[5-6,8,25]。水道复合体系是地震资料所能分辨的最佳水道沉积单元,其往往表现为“透镜状中-强振幅、中-低频率、低连续充填地震反射”(图1b)^[5-6,8,25]。

1.8 水道沉积体系

水道沉积体系是最大规模的水道沉积内幕单元,由多个水道复合体系不断侧向迁移、垂向加积而成;其两翼往往被天然堤所“夹持”,形成经典的“鸥-翼”状剖面形态特征^[5-6,8,25]。水道沉积体系的厚度从百余米到几千米不等、宽度从几百米到几千米不一(最大可达几十千米)(图1b)^[5-6]。

不同类型的深水水道或者同一水道的不同部分,其沉积内幕的复杂程度往往差别较大。譬如有些水道沉积内幕相对简单,内部不发育多期水道复合体系(图1a所示深水水道的上游),而有些水道沉积内幕则

相对复杂,内部可见多期水道复合体系(图1a所示深水水道的下游)。因而,应采用不同的方法,分情况(能否识别水道复合体系)对深水水道沉积内幕进行级次划分与精细刻画。依据“能否识别水道复合体系”,本文建立了“三界面-六相带”和“两界面-两相带”的深水水道沉积内幕的级次划分与精细刻画方法(图2)。

2 “三界面-六相带”沉积内幕级次划分与精细刻画

若待评价深水水道内部发育可见的水道复合体系时,则可以采用“三界面-六相带”沉积内幕解析方法(“三界面-六相带”法)开展水道沉积内幕的级次划分与精细刻画(图2—图4)

2.1 “三界面-六相带”沉积内幕级次划分

针对能识别水道复合体系的深水水道沉积体系,可以在水道内识别出“水道沉积体系底界面、水道复合体系底界面和沉积相带分界面”3类地质界面,并据此进行水道沉积内幕的级次划分(图2—图4)。

2.1.1 水道沉积体系底界面

该界面是目标水道中最大规模的侵蚀下切面,是围岩泥质沉积与水道沉积之间的地震相突变面;常常

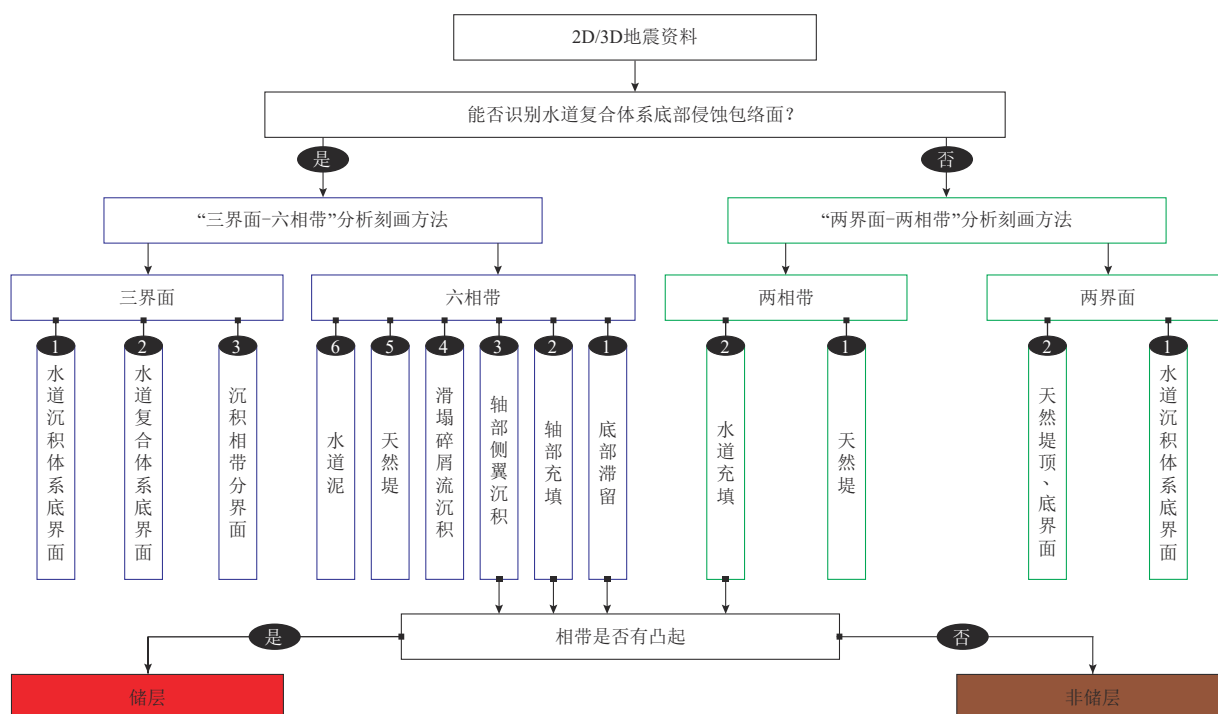


图2 深水水道沉积内幕级次划分与精细刻画方法流程

Fig. 2 Methodological workflow for the hierarchical division and fine architectural depiction of the interior of deep-water channel deposits

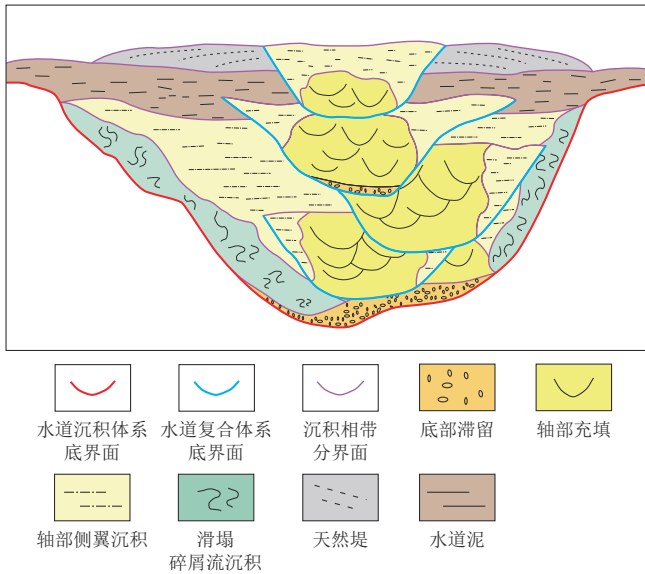


图3 可识别水道复合体系的水道沉积体系“三界面-六相带”沉积内幕模式

Fig. 3 Schematic model showing the internal architectures of deep-water channel deposits with seismically resolvable channel-complex sets using the methodology of “three boundaries plus six facies belts”

可以利用地震资料进行区域等时追踪对比(图3,图4)。水道沉积体系底界面之上可见双向上超地震反射终止关系,界面之下可见削截地震反射终止关系;具有明显的不整合面性质,相当于层序地层学中的三级层序界面。由于水道侵蚀的多期次性以及岩性变化的复杂性等,该界面并不是一个稳定的波峰或波谷界面,而是一个“反射极性不一(波峰、波谷皆可)、反射特征不同(振幅、频率和连续性等反射参数变化)”的包络面(图4中的红色实线)。

2.1.2 水道复合体系底界面

该界面是目标水道内部不同水道复合体系的底界面,在地震剖面上往往表现为次一级的V形或U形侵蚀下切面(图2—图4)。这些V形或U形侵蚀下切面之上可见双向上超地震反射终止关系,界面之下发育削截地质反射终止关系;常常可以利用地震资料进行区域等时追踪对比。与水道沉积体系底界面类似,该界面为“顶平底凸透镜状强振幅、中-低频率、中-低连续充填地震反射单元”的底部包络面,表现为“反射极性不一、反射特征不同”的V形或U形侵蚀下切面。

2.1.3 水道沉积相带分界面

该界面发育在水道复合体系内部或顶部,不再具有侵蚀下切特征(图2—图4)。沉积相带分界面表现

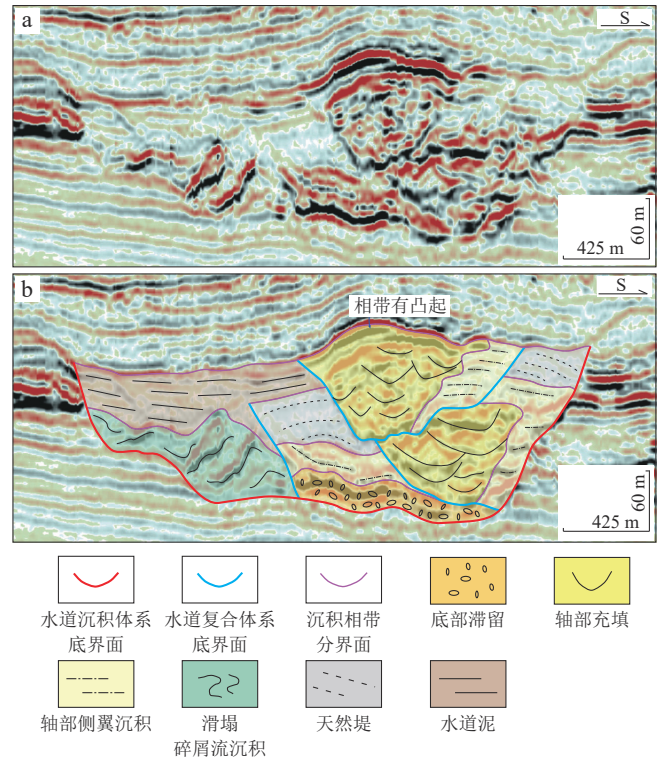


图4 可识别水道复合体系的水道沉积体系沉积内幕级次划分与精细刻画典型实例(中中新世西非下刚果盆地)

Fig. 4 Seismic examples showing the hierarchical division and fine architectural depiction of the interior of deep-water channel deposits with seismically resolvable channel-complex sets (a case study on the Middle Miocene Lower Congo Basin, West Africa)

a. 地震剖面;b. 对应“三界面-六相带”解释剖面

为具有相同“反射外形、反射参数(振幅、频率和连续性)和反射结构”的地震反射单元(地震相)的分界面。一般来说,水道沉积相带分界面仅可以利用地震资料进行小范围的追踪对比;且其横向变化快、无法进行区域等时追踪对比。

在利用地震资料识别和解释上述“三界面”(水道沉积体系底界面、水道复合体系底界面和沉积相带分界面)的基础上,可以完成深水水道沉积内幕的级次划分(图2)。具体来说,在某一水道沉积体系内部可依据所识别的水道复合体系底界面将目标水道划分为不同的水道复合体系(图2—图4)。水道沉积相带分界面发育在水道复合体系内部,其不能将水道复合体系进一步细分;可用于区分水道复合体系内部不同沉积相带单元(图2—图4)。例如,依据所识别的3个水道复合体系底界面(图4中的蓝色线),可将如图4所示的水道沉积体系划分出3期水道复合体系;而在每一水道复合体系内部,可依据水道沉积相带分界面划分出不同的相带单元(图4中的紫色线)。

2.2 “三界面-六相带”沉积内幕精细刻画

整个水道沉积体系与水道复合体系的沉积内幕可通过水道沉积相带分界面划分为6个相带单元(图2—图4)。

2.2.1 相带单元1(底部滞留)

发育在紧靠水道沉积体系或水道复合体系的底界面,具有“低频、连续、强振幅”的地震反射特征;其厚度不大、但地震反射特征明显(往往为1~2个地震反射同相轴)(图4;表1)。前人研究表明,这种发育分布在水道沉积体系谷底的“低频、连续、强振幅”反射为“重力流侵蚀下切形成水道雏形之后,重力流粗粒组分在水道最深谷底线两翼滞留堆积而成的底部滞留沉积”的典型地震响应(图4;表1)^[3,30-31]。底部滞留沉积一般是水道沉积体系中粒度最粗(可见含砾粗砂岩)的相带单元类型(图2—图4;表1)。

2.2.2 相带单元2(轴部充填)

发育在深水水道复合体系的轴部,表现为“牛眼

状或透镜状强振幅、中-低频率、低连续充填地震反射”(图4;表1)。这类地震相往往被解释为“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多次冲刷滞留后所形成的水道轴部充填”(图4;表1)^[3,30-31]。故而,水道轴部充填是水道复合体系内部最为富砂的相带单元类型(图2—图4;表1)。

2.2.3 相带单元3(轴部侧翼沉积)

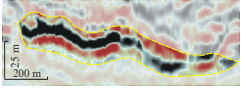
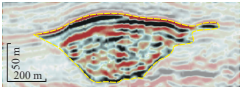
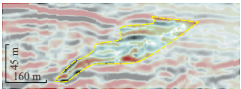
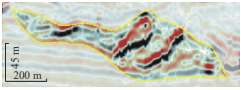
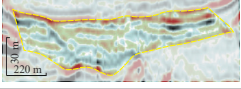
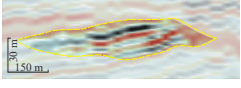
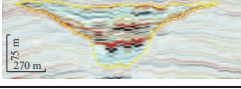
发育在深水水道复合体系轴部充填(相带单元2)的两翼,具有“不规则状中-弱振幅、中-低频、中-低连续透明反射”的剖面地震响应特征(图4;表1)。相带单元3与水道轴部充填往往伴生出现,是“沟道化浊流底部高密度组分与限定性较弱的低密度浊流多次冲刷沉积在水道翼部的沉积充填”(图4;表1)^[3,30-31]。因而,轴部侧翼沉积是水道复合体系内部相对较为富砂的相带单元类型(图2—图4;表1)。

2.2.4 相带单元4(滑塌碎屑流沉积)

靠近水道沉积体系底界面或水道复合体系底界面的“侧壁”发育展布,整体呈“杂乱地震反射,局部可见

表1 水道复合体系内部不同相带发育特点与沉积解释

Table 1 Characteristics and interpretation of different facies belts in the channel-complex set

相带单元	地震反射剖面	岩性	沉积过程	规模	剖面特点
底部滞留		砂岩、含砾砂岩	重力流侵蚀下切形成水道雏形之后,重力流粗粒组分在水道最深谷底线两翼滞留堆积而形成的沉积	厚度约十余米,宽度可达数百米	强振幅、低频、连续反射,通常无法识别凸起特征
轴部充填		砂岩为主,含砂率最高	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多次冲刷滞留后形成的沉积	沿水道主体分布,宽度可达上千米,厚度可达数百米	透镜状强振幅、中-低频、中-低连续充填反射,通常具备向上凸起特点
轴部侧翼沉积		砂、泥岩均有发育	沟道化浊流底部高密度组分和限定性较弱的低密度浊流多次冲刷沉积在水道翼部的沉积充填	与轴部充填伴生,宽度可达上千米,厚度可达数百米	不规则状中-弱振幅、中-低频、中-低连续反射,通常不具备向上凸起特点
滑塌碎屑流沉积		砂岩、泥岩混杂	粗细混杂、快速搬运堆积的块体流沉积	局部发育,宽度可达数百米,厚度数十米	杂乱地震反射,局部可见倾斜或揉皱变形
水道泥		泥岩为主	浓度较小、密度较小、粒度较细、限定性较弱的低密度浊流形成的沉积	沿水道主体分布,宽度可达上千米,厚度可达数百米	弱振幅、高频、中-高连续透明反射
天然堤		泥岩	浓度较小、粒度较细、密度较小、限定性较弱的低密度浊流溢岸形成的沉积	沿水道两翼分布,宽度可达上百米,厚度可达数十米	楔状弱振幅、低频、中-高连续反射
砂质水道充填		砂质充填为主	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多次冲刷滞留后形成的沉积	沿水道主体分布,宽度可达上千米,厚度可达数百米	透镜状强振幅、中-低频、中连续充填反射
泥质水道充填		泥质充填为主	浓度较小、密度较小、粒度较细、限定性较弱的低密度浊流形成的沉积	沿水道主体分布,宽度可达上千米,厚度可达数百米	楔状弱振幅、低频、中-高连续反射

倾斜或揉动变形地震反射同相轴”(图4;表1)。在深水水道沉积环境中,杂乱地震反射往往是“粗细混杂、快速搬运堆积的块体流”的典型地震相特征,往往被解释为“滑塌碎屑流沉积”“块体流沉积”“块状搬运复合体”(图2—图4;表1)^[3,30-31]。该相带内部的揉皱变形特征类似于块体搬运体的挤压脊,是沉积物发生块状搬运变形而成的产物。这类相带往往相对富泥^[3]。

2.2.5 相带单元5(水道泥)

水道复合体系内部或顶部,还有一类呈“弱振幅、高频、中连续透明反射”特征的地震相;其具有不规则状的剖面形态特征(图4;表1)。在深水水道沉积环境中,这类弱振幅透明反射往往被解释为“浓度较小、粒度较细、密度较小、限定性较弱的低密度浊流所形成的水道泥”(图2—图4;表1)^[3,30-31]。

2.2.6 相带单元6(天然堤)

在水道复合体系的两翼发育出现,具有“楔状弱振幅、低频、中-高连续反射”的地震相特征(图4;表1)。这类地震相往往出现在某一水道沉积体系内部晚期水道复合体系的两翼,与水道复合体系构成经典的“鸥-翼”状剖面外形特征(图4;表1)。在深水水道沉积环境中,这类地震相往往被解释成“浓度较小、粒度较细、密度较小、限定性较弱的低密度浊流溢岸所形成的天然堤”(图2—图4;表1)^[1,12,24]。

这6个相带单元中,“底部滞留、轴部充填或轴部侧翼沉积”3个相带单元相对富砂,它们在剖面上常表现为“地震反射单元中部厚度大、向两翼减薄尖灭的透镜状”。这种向上凸起的透镜状地震反射外形常常有2种成因:中间的沉积速率大,两翼沉积速率小所造成(如陆相河道或海相峡谷水道),即原生成因;中间砂岩发育、抗压实能力强,而两翼泥岩发育、抗压实能力弱,成岩过程中由于差异压实作用而形成,即次生成因。故而,可以利用透镜状地震反射外形的凸起程度对其富砂程度进行快速评价。一般而言,透镜状地震反射外形的凸起程度愈明显,则其所对应的沉积单元越富砂;反之亦然。因而,当“底部滞留、轴部充填或轴部侧翼沉积”所组成的复合相带单元顶部有凸起时,则表明它们富砂程度较高,为有效的深水油气储层类型;反之当这些复合相带单元顶部无明显凸起时,则表明它们富砂程度低,为非储层类型(图2—图4;表1)。

综上所述,在能够识别水道复合体系的水道体系内,可利用地震资料依据“三界面”(水道沉积体系底界面、水道复合体系底界面和沉积相带分界面)进行沉积

内幕的级次划分;并结合地震相特点,识别和刻画“六相带”(底部滞留、轴部充填、轴部侧翼沉积、滑塌碎屑流沉积、水道泥和天然堤);最后依据相带是否具有凸起外形这一特点,快速评判“底部滞留、轴部充填和轴部侧翼沉积”3个相带的富砂性。

3 “两界面-两相带”沉积内幕级次划分与精细刻画

若拟评价的深水水道未发育可见的水道复合体系时,可以采用“两界面-两相带”法开展水道沉积内幕的级次划分与精细刻画。

3.1 “两界面-两相带”沉积内幕级次划分

针对不可识别水道复合体系的深水水道沉积体系,可以在水道内部识别出“水道沉积体系底界面和天然堤顶、底界面”两类地质界面(图2,图5,图6)。

3.1.1 水道沉积体系底界面

该界面为目标水道中可识别的最大规模侵蚀下切

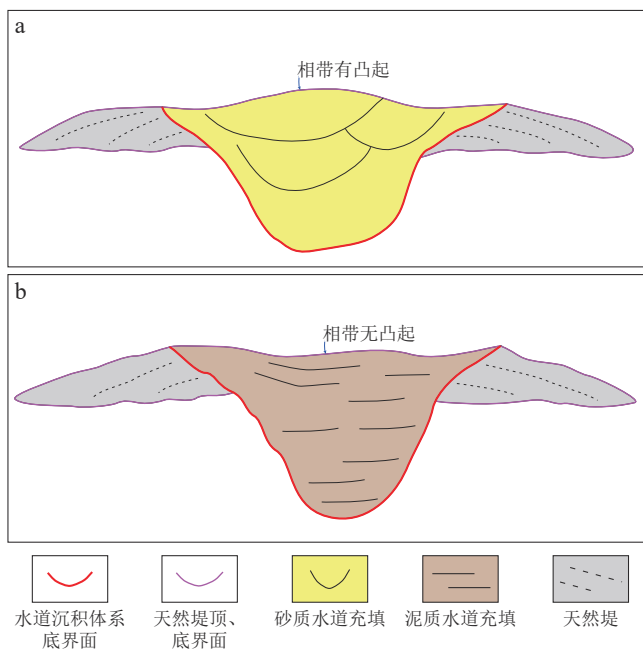


图5 不可识别水道复合体系的水道沉积体系“两界面-两相带”沉积内幕模式

Fig. 5 Schematic model showing the internal architecture of deep-water channel deposits without seismically resolvable channel-complex sets using the methodology of two boundaries plus two facies belts

a. 发育凸起特征的“两界面-两相带”剖面模式;b. 不发育凸起特征的“两界面-两相带”剖面模式

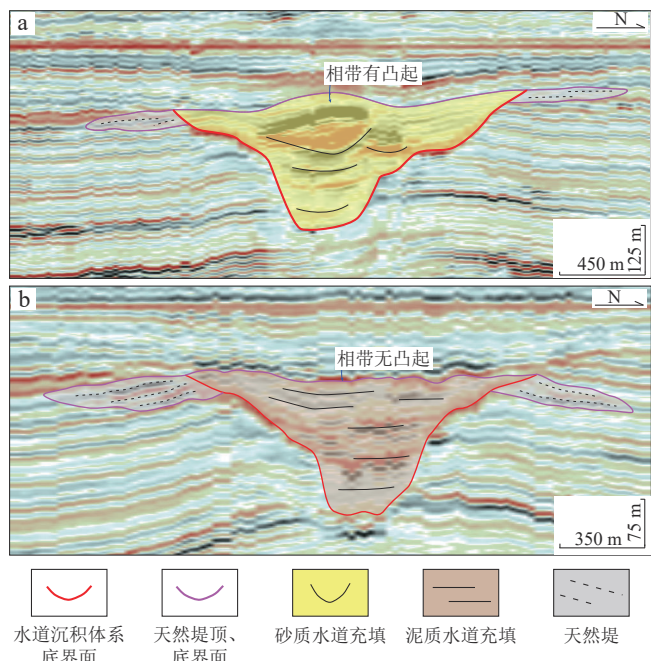


图6 不可识别水道复合体系的水道沉积体系沉积内幕级次划分与精细刻画典型实例(中中新世西非下刚果盆地)

Fig. 6 A seismic example showing the hierarchical division and fine architectural depiction of the interior of deep-water channel deposits without seismically resolvable channel-complex sets (a case study on the Middle Miocene Lower Congo Basin, West Africa)

a. 发育凸起特征的地震剖面及“两界面-两相带”解释;b. 不发育凸起特征的地震剖面及“两界面-两相带”解释

面,是深海泥岩或天然堤与水道沉积之间的地震相突变面;常常表现为V形或U形侵蚀下切面,可利用地震资料进行区域等时追踪对比(图2,图5,图6)。水道沉积体系底界面之上可见双向上超、界面之下可见削截地震反射终止关系;表现出明显的不整合界面的特征。但由于水道内部岩性变化,该界面也往往是一个“反射极性不同、反射特征不一”的包络面(图6中的红色实线)。

3.1.2 天然堤顶、底界面

该界面发育目标水道的两翼,其与水道沉积体系底界面构成经典的“鸥-翼”状剖面外形特征(图2,图5,图6)。该界面往往为“楔状弱振幅、中-高频、高连续性侧向积反射”的顶、底包络面(图6b中的紫色实线)。

相较于前已述及的“能识别出水道复合体系的深水水道”,这类深水水道内部无地震资料可分辨的水道复合体系出现(图6b中的局部强振幅)。故而,这类深水水道难以进行水道沉积内幕的级次划分(图2,图5,图6)。

3.2 “两界面-两相带”沉积内幕精细刻画

针对不可识别水道复合体系的水道沉积体系,可通过“水道沉积体系底界面和天然堤顶、底界面”将目标水道划分为2个相带单元。

3.2.1 相带单元1(水道充填)

发育在水道沉积体系底界面内部,具有“顶凸底凸状强振幅、中-低频、中连续充填反射”与“顶平底凸状弱振幅、中-高频、中连续充填反射”两种地震相(图6)。其中,前一种地震相的解释类似于前文“三界面-六相带”法中的“相带单元2(水道轴部充填)”,是“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多次冲刷滞留后所形成的砂质水道充填”的典型地震响应类型^[3,30-31]。而后一种地震相解释类似于前已述及的“三界面-六相带”法中的“相带单元5(水道泥)”,是“浓度较小、粒度较细、密度较小、限定性较弱的低密度浊流所形成的泥质水道充填”的典型地震响应类型(图2,图5,图6;表1)^[1,12,24]。

3.2.2 相带单元2(天然堤)

在水道沉积体系的两翼发育,表现为“楔状弱振幅、中-高频、高连续侧向积反射”的地震相特征;其与相带单元1(水道充填)构成经典的“鸥-翼”状剖面外形特征(图6;表1)。该相带地震反射特征及其解释也类似于前文“六相带”中的“相带单元6(天然堤)”,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岸所形成的天然堤”(图2,图5,图6;表1)^[1,12,24]。

这两个水道相带单元中,“相带单元1(水道充填)”相对富砂。依据前已述及的“中部厚度大、向两翼减薄尖灭的透镜状的次生成因”可知:在剖面上表现为“地震反射单元中部厚度大、向两翼减薄尖灭的透镜状”的“水道充填”,是中间砂岩发育、两翼泥岩发育,差异压实的结果。因此,这种水道充填的富砂程度较好,可做有效的深水油气储层(图6a所示的中中新世西非下刚果盆地目标水道);而未在地震剖面上表现出明显顶部凸起特点的水道充填则不具备砂岩与泥岩差异压实的条件,往往富砂程度低或相对富泥,为非储层类型(如图6b所示的中中新世西非下刚果盆地目标水道)。

综上所述,在无法识别水道复合体系的水道沉积体系内,可依据“两界面”(水道沉积体系底界面和天然堤顶、底界面),将目标水道区分为两个沉积相带(水道充填和天然堤)(图2,图5,图6)。在此基础上,依据是否具有凸起外形对“水道充填”相带进行富砂性快速评判。

4 “三界面-六相带”与“两界面-两相带”沉积内幕级次与相带差异

由这两类水道沉积体系的示例剖面可知,这两个下刚果盆地中的水道在剖面规模上无较大差异(图4中水道宽约2.2 km,厚约250 m;图6中水道宽约1.6 km,厚约270 m),但两类水道的内部地震反射特征差异较大,在沉积内幕的级次和发育相带上也有着较大的不同(图4,图6;表1)。

4.1 “三界面-六相带”与“两界面-两相带”沉积内幕级次差异

如可使用“三界面-六相带”进行内幕级次划分的深水水道,其内幕发育的地质界面数量和类型更多:如图4所示,该水道沉积体系内部共发育3类地质界面(1个水道沉积体系底界面、3个水道复合体系底界面和8个沉积相带分界面),水道内幕可进行划分的级次也更多(4期水道复合体系)。而可使用“两界面-两相带”进行内幕级次划分的深水水道,其内幕不发育其他地质界面,只发育1个水道沉积体系底界面和两个沉积相带分界面(如图6),水道内幕也不能进一步划分级次。

4.2 “三界面-六相带”与“两界面-两相带”沉积内幕相带差异

同样,可使用“三界面-六相带”进行内幕级次划分的深水水道,其沉积内幕的相带也发育较多,共发育6个相带:①表现为强振幅、低频、连续反射,为粒度最粗的底部滞留沉积;②表现为透镜状强振幅、中-低频、中-低连续反射,通常为富砂的轴部充填沉积;③表现为不规则中-弱振幅、中-低频、中-低连续反射的轴部侧翼沉积;④表现为杂乱反射、局部可见变形特征的滑塌碎屑流沉积;⑤表现为弱振幅、高频、中-高连续反射的水道泥;⑥表现为楔状弱振幅、低频、中-高连续反射的天然堤(图4;表1)。

而可使用“两界面-两相带”进行内幕级次划分的深水水道,只发育2个相带:①表现为凸起状强振幅、中-低频率、中连续充填反射的砂质水道充填(或顶平底凸状弱振幅、中-高频、中连续充填反射的泥质水道充填);②表现为楔状弱振幅、低频、中-高连续反射的天然堤(图6;表1)。

因此,发育“三界面-六相带”的深水水道,其地震反射特征更加复杂,沉积内幕级次发育更多、相带发育也更为复杂(图2,图4,图6)。

5 应用实例与效果

利用上述“三界面-六相带”法和“两界面-两相带”法,对图7—图9所示的南海西北陆缘琼东南盆地乐东凹陷晚中新世深水水道沉积体系进行沉积内幕的级次划分与精细刻画。

5.1 “三界面-六相带”法应用实例与效果

图7a和图8a所示的深水水道沉积体系发育可见多期的水道复合体系(图7b中的CCS1—CCS4,图8b中的CCS2—CCS4),故而可采用“三界面-六相带”法来进行沉积内幕的级次划分与精细刻画。

图7a和图8a所示的深水水道沉积体系,其发育3类地质界面:水道沉积体系底界面、水道复合体系底界面和水道沉积相带分界面(图7b,图8b)。其中,水道沉积体系底界面(图7b和图8b中的红色实线)和水道复合体系底界面(图7b和图8b中的蓝色实线)均具有

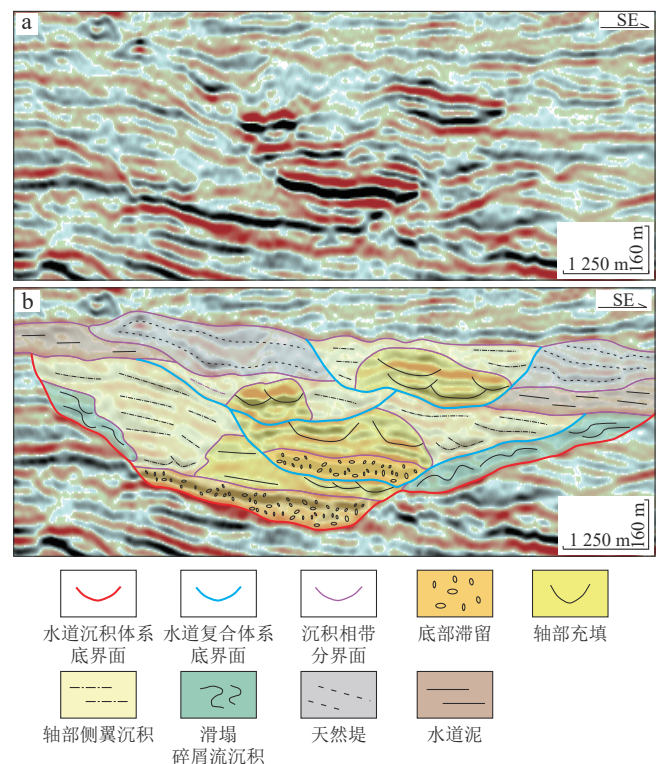


图7 可识别水道复合体系的水道沉积体系沉积内幕级次划分与精细刻画典型实例(来自晚中新世琼东南盆地乐东凹陷)

Fig. 7 Uninterrupted and interpreted seismic profiles showing the hierarchical division and fine architectural depiction of the interior of deep-water channel deposits with seismically resolvable channel-complex sets (a case study on the Late Miocene Ledong Sag of the Qiongdongnan Basin)

a. 未解释地震剖面;b. 对应“三界面-六相带”解释剖面

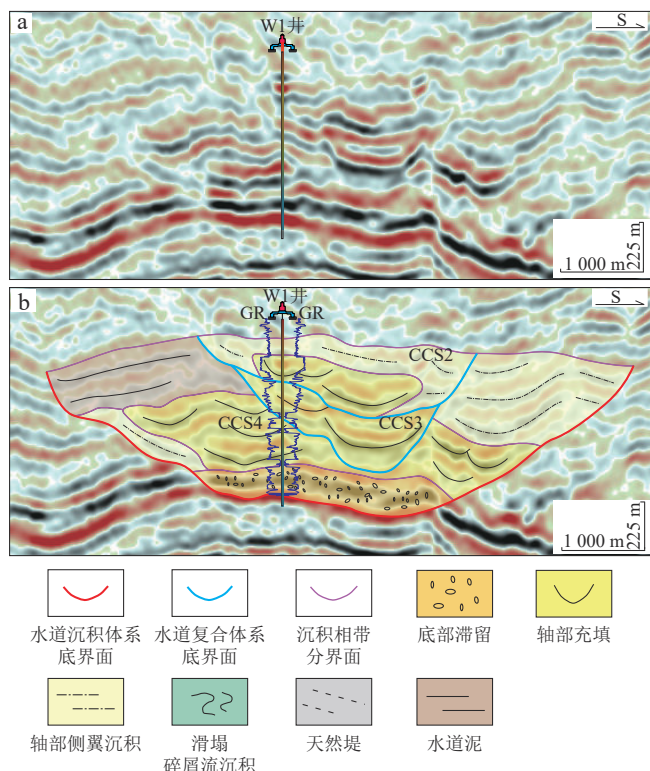


图8 可识别水道复合体系的水道沉积体系沉积内幕的级次划分与精细刻画典型实例(来自晚中新世琼东南盆地乐东凹陷)
Fig. 8 Uninterrupted and interpreted seismic profiles showing the hierarchical division and fine architectural depiction of the interior of deep-water channel deposits with seismically resolvable channel-complex sets (a case study on the Late Miocene Ledong Sag of the Qiongdongnan Basin)

a. 未解释地震剖面;b. 对应“三界面-六相带”解释剖面

侵蚀下切特征,界面之下均发育可见削截地震反射终止关系、界面之上均发育可见上超地震反射终止关系;而水道沉积相带分界面是具有不同“反射外形、反射参数和反射结构”的地震相单元的分界面(图7b和图8b中的紫色实线)。如图7b所示,在目标水道内共识别了1个水道沉积体系底界面、3个水道复合体系底界面以及多个水道沉积相带分界面。

依据图7b和图8b中的“水道复合体系底界面”,可将乐东凹陷晚中新世的目标水道分别划分出4期水道复合体系(图7b中的CCS1—CCS4)和3期水道复合体系(图8b中的CCS2—CCS4);而每一期水道复合体系又以水道沉积相带分界面为界可识别划分出不同的沉积相带。其中,第四期水道复合体系(图7b和图8b中的CCS4)主要发育“底部滞留、轴部充填、轴部侧翼和滑塌碎屑流沉积”4个沉积相带;第三期水道复合体系(图7b和图8b中的CCS3)主要发育“底部滞留、轴部充填或轴部侧翼”3个沉积相带;第二期水道复合体系

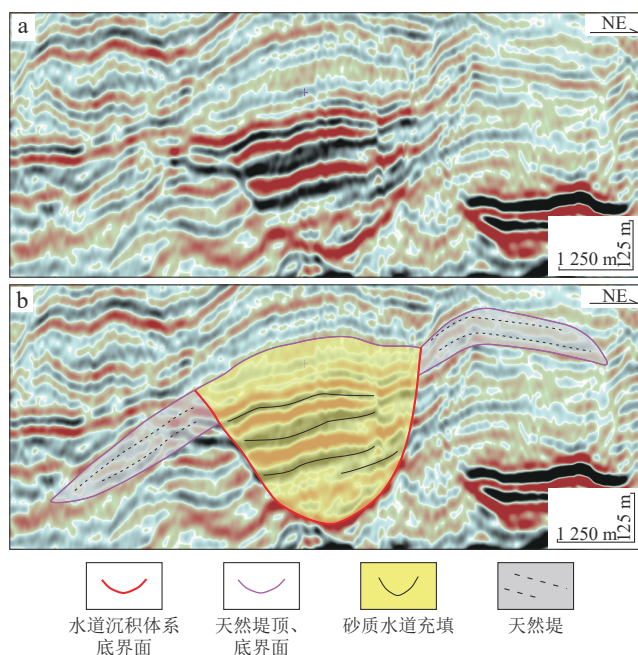


图9 不可识别水道复合体系的水道沉积体系沉积内幕级次划分与精细刻画典型实例(来自晚中新世琼东南盆地乐东凹陷)
Fig. 9 Uninterrupted and interpreted seismic transects showing the hierarchical division and fine architectural depiction of the interior of deep-water channel deposits without seismically resolvable channel-complex sets (a case study on the Late Miocene Ledong Sag of the Qiongdongnan Basin)

a. 未解释地震剖面;b. 对应“两界面-两相带”解释剖面

(图7b和图8b中的CCS2)主要发育“轴部充填和轴部侧”2个相带单元;第一期水道复合体系(图7b中的CCS1)主要发育“轴部充填、轴部侧翼、天然堤和水道泥”4个相带单元。

上述4期水道复合体系虽然发育的沉积相带各不相同,但每一期水道复合体系的轴部均发育“底部滞留、轴部充填或轴部侧翼”3个相带单元(图7,图8)。前已述及,这3个相带单元的富砂程度可依据“它们所对应的透镜状地震反射外形的凸起程度”来进行评价。在图8所示的待评价水道“底部滞留、轴部充填或轴部侧翼”所组成的沉积单元相较于图7凸起幅度更为明显,说明图8所示水道更为富砂。钻井结果显示:在CCS4的底部滞留相带钻遇了测井曲线表现为箱状的砂岩累计厚约50m;轴部充填相带钻遇砂岩累计厚约100m,砂/地比约0.65;CCS3的轴部充填相带中,钻遇砂岩累计厚约60m,砂/地比约0.60;CCS2的轴部充填相带中钻遇砂岩累计厚约45m,砂/地比也接近0.60。实钻结果对比可知,这一水道沉积体系的“底部滞留、轴部充填相带”所构成的沉积单元富砂,且富砂程度较高。

由此可见,可采用“三界面-六相带”法对发育水道复合体系的深水水道沉积体系进行沉积内幕的级次划分与精细刻画。

5.2 “两界面-两相带”法应用实例与效果

如图9a所示的深水水道沉积体系未发育可见的水道复合体系,因此采用“两界面-两相带”法进行沉积内幕的级次划分与精细刻画(图9b)。该水道沉积体系位于晚中新世琼东南盆地乐东凹陷的另一区域,发育2类地质界面:水道沉积体系底界面和天然堤顶底界面(图9b)。其水道沉积体系底界面(图9b中的红色实线)具有明显的侵蚀下切特征,界面之上发育双向上超地震反射终止关系,界面之下可见削截地震反射终止关系。天然堤顶底界面(图9b中的紫色实线)则是发育在水道沉积体系底界面外部,表现为由水道两翼向外部侧向尖灭的楔形。在该目标水道内共识别出了1个水道沉积体系底界面和2个天然堤顶底界面。

依据所识别解释的“水道沉积体系底界面”和“天然堤顶底界面”,可将该水道沉积体系划分为“水道充填”和“天然堤”2个相带单元(图9b)。其中“水道充填”相带表现为“透镜状中-强振幅、中频、连续”地震反射;“天然堤”相带表现为“楔状中-弱振幅、中频、连续”地震反射。

前已述及,“水道充填”相带的富砂程度可依据“其透镜状地震反射外形的凸起程度”来进行评价。如图9所示,晚中新世乐东凹陷目标水道的“水道充填”相带在地震剖面中具有较为明显的顶凸程度,富砂程度较高(含砂率较高)。

综上所述,本研究所提出的“基于地震资料的深水水道沉积内幕的级次划分与精细刻画方法”,对于深水水道的油气勘探来讲,可以利用地震资料快速实现水道内幕的解剖与刻画;另一方面,对比利用常规井控反演手段进行的深水水道富砂性分析而言^[32],该方法可在无井工况下快速评价水道相带的富砂性。因此,该方法具有一定的应用前景。

6 结论

1) 在能够识别解释水道复合体系底界面的情况下,可通过“三界面-六相带”法识别“三界面”(水道沉积体系底界面、水道复合体系底界面和沉积相带分界面);据此将目标水道沉积内部划分为不同的水道复合体系,在每一期水道复合体系内部依据沉积相带分界面可识别出“六相带”(底部滞留、轴部充填、轴部侧翼沉

积、滑塌碎屑流沉积、天然堤和水道泥)。每一期水道复合体系的轴部均发育“底部滞留、轴部充填或轴部侧翼沉积”3个相带单元;它们所构成的沉积单元在地震剖面上的顶凸程度愈明显则富砂性越高,反之亦然。

2) 在不能识别解释水道复合体系底界面的情况下,可通过“两界面-两相带”法识别“两界面”(水道沉积体系底界面和天然堤顶、底界面);据此可将目标水道区分为“两相带”(水道充填和天然堤),但无法依据这两类地质界面在地震资料中进行目标水道沉积内幕的级次划分。其水道充填相带的富砂程度可依据在地震剖面上的顶凸程度来判识,顶凸程度越明显则富砂性就愈高,反之亦然。

参 考 文 献

- [1] CLARK J D, PICKERING K T. Architectural elements and growth patterns of submarine channels: Application to hydrocarbon exploration[J]. AAPG Bulletin, 1996, 80(2): 194-220.
- [2] PEAKALL B 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.
- [3] 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.
- [4] ALPAK F O, BARTON M D, NARUK S J. The impact of fine-scale turbidite channel architecture on deep-water reservoir performance[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(2): 251-284.
- [5] GONG Chenglin, WANG Yingmin, ZHU Weilin, et al. Upper Miocene to Quaternary unidirectionally migrating deep-water channels in the Pearl River Mouth Basin, northern South China Sea[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(2): 285-308.
- [6] GONG Chenglin, STEEL R J, QI Kun, et al. Deep-water channel morphologies, architectures, and population densities in relation to stacking trajectories and climate states[J]. GSA Bulletin, 2021, 133(1/2): 287-306.
- [7] 李华, 何幼斌. 深水重力流水道沉积研究进展[J]. 古地学报, 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.
- [8] 赵晓明, 刘飞, 葛家旺, 等. 深水水道沉积构型单元分级与结构样式[J]. 沉积学报, 2023, 41(1): 37-51.
ZHAO Xiaoming, LIU Fei, GE Jiawang, et al. Sedimentary architecture unit classification and structural style of deep-water channels[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(1): 37-51.
- [9] 童晓光, 张光亚, 王兆明, 等. 全球油气资源潜力与分布[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(4): 727-736.
TONG Xiaoguang, ZHANG Guangya, WANG Zhaoming, et al. Distribution and potential of global oil and gas resources[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(4): 727-736.

- [10] 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(6/9): 388–405.
- [11] MCARTHUR A D, KNELLER B C, SOUZA P A, et al. Characterization of deep-marine channel-levee complex architecture with palynofacies: An outcrop example from the Rosario Formation, Baja California, Mexico [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2016, 73: 157–173.
- [12] 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.
- [13] HE Zhiguo, ZHAO Liang, HU Peng, et al. Investigations of dynamic behaviors of lock-exchange turbidity currents down a slope based on direct numerical simulation [J]. *Advances in Water Resources*, 2018, 119: 164–177.
- [14] THOTA S T, ISLAM M A, SHALABY M R. Reservoir quality evaluation using sedimentological and petrophysical characterization of deep-water turbidites: A case study of Tariki Sandstone Member, Taranaki Basin, New Zealand [J]. *Energy Geoscience*, 2023, 4(1): 13–32.
- [15] 李华, 何幼斌, 谈梦婷, 等. 深水重力流水道-朵叶体系形成演化及储层分布——以鄂尔多斯盆地西缘奥陶系拉什仲组露头为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 917–928.
- LI Hua, HE Youbin, TAN Mengting, et al. Evolution of and reservoir distribution within deep-water gravity flow channel-lobe system: A case study of the Ordovician Lashenzhong Formation outcrop at western margin of Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 917–928.
- [16] 孙辉, 范国章, 邵大力, 等. 深水局部限制型水道复合体沉积特征及其对储层性质的影响——以东非鲁武马盆地始新统为例[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(6): 1440–1450.
- SUN Hui, FAN Guozhang, SHAO Dali, et al. Depositional characteristics of locally restricted channel complex in deep water and its influence on reservoir properties: A case study of the Eocene series, Rovuma Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6): 1440–1450.
- [17] 张文彪, 陈志海, 刘志强, 等. 深水水道形态定量分析及沉积模拟——以西非Gengibre油田为例[J]. *石油学报*, 2015, 36(1): 41–49.
- ZHANG Wenbiao, CHEN Zhihai, LIU Zhiqiang, et al. Morphology quantitative analysis and simulation of deepwater channel: A case study of Gengibre Oilfield in West Africa [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(1): 41–49.
- [18] 李全, 吴伟, 康洪全, 等. 西非下刚果盆地深水水道沉积特征及控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(4): 917–929.
- LI Quan, WU Wei, KANG Hongquan, et al. Characteristics and controlling factors of deep-water channel sedimentation in Lower Congo Basin, West Africa [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(4): 917–929.
- [19] 陈华, 林畅松, 张忠民, 等. 西非下刚果—刚果扇盆地A区块中新统深水水道体系沉积特征及演化[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(3): 476–486.
- CHEN Hua, LIN Changsong, ZHANG Zhongmin, et al. Depositional characteristics and evolution of Miocene deep-water channel systems in Block A of Lower Congo-Congo Fan Basin, West Africa [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2021, 43(3): 476–486.
- [20] PICKERING K T, CANTALEJO B. Deep-marine environments of the Middle Eocene Upper Hecho Group, Spanish Pyrenees: Introduction [J]. *Earth-Science Reviews*, 2015, 144: 1–9.
- [21] SYLVESTER Z, PIRMEZ C, CANTELLI A. A model of submarine channel-levee evolution based on channel trajectories: Implications for stratigraphic architecture [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(3): 716–727.
- [22] JOBE Z R, HOWES N C, AUCHTER N C. Comparing submarine and fluvial channel kinematics: Implications for stratigraphic architecture [J]. *Geology*, 2016, 44(11): 931–934.
- [23] NAVARRE J C, CLAUDE D, LIBERELLE E, et al. Deepwater turbidite system analysis, West Africa: Sedimentary model and implications for reservoir model construction [J]. *The Leading Edge*, 2002, 21(11): 1132–1139.
- [24] WYNN R B, CRONIN B T, PEAKALL J. Sinuous deep-water channels: Genesis, geometry and architecture [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2007, 24(6/9): 341–387.
- [25] STRIGHT L, STEWART J, CAMPION K, et al. Geologic and seismic modeling of a coarse-grained deep-water channel reservoir analog (Black's Beach, La Jolla, California) [J]. *AAPG Bulletin*, 2014, 98(4): 695–728.
- [26] MUTTI E, NORMARK W R. Comparing examples of modern and ancient turbidite systems: Problems and concepts [M]//LEGGETT J K, ZUFFA G G. *Marine Clastic Sedimentology: Concepts and Case Studies*. Dordrecht: Springer, 1987: 1–38.
- [27] SPRAGUE A R G, GARFIELD T R, GOULDING F J, et al. Integrated slope channel depositional models: The key to successful prediction of reservoir presence and quality in offshore West Africa [C]. Veracruz: CIPM, 2005: 1–13.
- [28] CAMPBELL C V. Lamina, laminaset, bed and bedset [J]. *Sedimentology*, 1967, 8(1): 7–26.
- [29] BOUMA A H. *Sedimentology of some Flysch deposits; a graphic approach to facies interpretation* [M]. Amsterdam: Elsevier, 1962: 168.
- [30] 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.
- [31] MAYALL M, KNELLER B. Seismic interpretation workflows for deep-water systems: A practical guide for the subsurface [J]. *AAPG Bulletin*, 2021, 105(11): 2127–2157.
- [32] 蔡露露, 刘春成, 吕明, 等. 西非下刚果盆地深水水道发育特征及沉积储层预测[J]. *中国海上油气*, 2016, 28(2): 60–70.
- CAI Lulu, LIU Chun Cheng, LYU Ming, et al. The development characteristics of deep water channel and sedimentary reservoir prediction in Lower Congo Basin, West Africa [J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2016, 28(2): 60–70.