

川西坳陷陆相致密气藏河道砂岩储层 精细刻画技术及其应用

武恒志,叶泰然,赵迪,马如辉

(中国石化西南油气分公司,四川成都610041)

摘要:川西坳陷侏罗系砂岩储层具有低渗致密的特点,主要为三角洲相分流河道沉积。河道纵向叠置关系复杂、砂岩厚度薄、岩性及物性横向变化明显,但地震资料分辨率有限,河道砂岩储层预测及刻画难度大,制约着开发目标评价及井网部署。采用从宏观到微观、从定性到定量、从外形精细刻画至内幕非均质性评价逐步逼近的综合研究思路,重点集成了井-震一体化河道沉积层序识别、河道砂体叠加样式正演、相带空间刻画和递进反演相控储层定量描述等关键技术,解决了河道期次划分、叠置样式预测、外形刻画和定量描述等多个难题,实现以单河道为单元的气藏精细开发目标评价,取得了明显的应用效果,并形成了陆相致密气藏河道砂岩储层精细刻画与描述技术体系。

关键词:层序;相带;河道砂岩;储层;岩性气藏;川西坳陷

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Fine characterization technique and its application to channel sandstone in continental tight gas reservoirs of western Sichuan Depression

Wu Hengzhi, Ye Tairan, Zhao Di, Ma Ruhui

(Southwest Petroleum Branch Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041)

Abstract: The Jurassic sandstone reservoirs in western Sichuan Depression are mainly of delta distributary channel deposits, featuring in tightness and low permeability. The channel sands are complex invertical superimposition, small in thickness, and large in variations of lithology and poroperm characteristics. It is difficult to predict and characterize those reservoirs due to the limited seismic resolution, constraining target evaluation and well pattern deployment. A comprehensive method was adopted to study the reservoirs from macroscopic to microscopic observation, from qualitative to quantitative analysis and from appearance description to internal heterogeneity evaluation. Several key techniques were proposed, including channel sedimentary sequence identification, forward modeling of stacked channel sands, description of space distribution of facies and quantitative characterization of reservoirs based on progressive inversion. They were successfully used in subdivision of channel sequence, prediction of stacking pattern and quantitative description of appearance, making it possible to perform fine evaluation of development target with single channel as an appraisal unit. A technology system was established for fine description and characterization of continental channel sands in tight-gas reservoirs.

Key words: sequence, facies belt, channel sandstone, reservoir, lithologic gas reservoir, western Sichuan Depression

川西坳陷侏罗系岩性气藏埋深700~2 500 m,气藏主要受河道砂岩储层分布控制。“九五”科技攻关首次利用三维地震储层预测技术实现了新场气田勘探开发重大突破,先后在四川盆地川西坳陷建成多个大、中型气田,这些气田主要位于正向构造带上并以成都凹陷周边的新场气田、马井气田和洛带气田等为典型代表。2011年以来,伴随“叠覆型致密砂岩气区”成藏地质理论和“相带控砂、河道控储、断砂输导、网状运移、差异聚集、甜点控产”地质认识的提出^[1-5],川西坳

陷侏罗系岩性油气藏迈出了向斜坡区及凹陷区勘探开发的步伐。依托地球物理储层预测技术和水平井分段压裂等关键技术攻关及突破,实现了多个勘探发现,落实了多个开发建产阵地,产能建设取得了重要进展。在地球物理储层预测技术方面,早期主要采用振幅类、频率类、相位类、相关类、波形聚类和三维可视化等技术进行河道储层预测和刻画,在正向构造带储层厚度大及地球物理特征相对易于识别区域取得了明显效果^[6-9]。伴随勘探开发区域拓展、预测目标地质特征

收稿日期:2014-09-28;修订日期:2014-12-08。

第一作者简介:武恒志(1964—),男,博士、教授级高级工程师,石油地质。

复杂性增加及开发对地球物理预测精细化、量化需求(如对小层开发需要明确各单一河道分布、河道内幕沉积结构、薄储层厚度、储层物性非均质性等),早期技术的局限性越来越明显,预测精度难以满足生产需求。近年来,确立地震、地质一体化综合研究思路,通过科技攻关,地球物理预测技术取得重要进展,以河道沉积层序识别、储层叠置样式识别、相带精细刻画、定量描述等为代表的关方法技术的成功应用,有效支撑了川西坳陷侏罗系陆相致密气藏增储上产成果的取得。

1 河道砂岩储层基本特征与预测难点

1.1 河道砂岩储层基本特征

川西坳陷中、浅层侏罗系岩性气藏为次生远源气藏,烃源岩主要为下伏三叠系须家河组地层,优质储集层的分布和发育规模决定了气藏的分布和规模,侏罗系蓬莱镇组及沙溪庙组两大主力气藏储层均以河道砂岩为主。沉积物源主要来自坳陷东北部米仓山及龙门山北段,同时具有少量龙门山中南段物源。在单井和典型剖面沉积相分析以及200余口钻井砂岩厚度和含砂率统计基础上,落实了各层段沉积相平面分布特征。其中,河流相主要发育在坳陷北部,属于辫状河、网状河三角洲沉积体系。成都凹陷以东沉积相以三角洲平原和前缘为主,在南部主要为前三角洲和湖泊相,河道砂体主要呈北东-南西向展布。河道砂岩岩石类型主要为岩屑砂岩、长石岩屑砂岩和岩屑石英砂岩。砂岩以细粒结构为主,并广泛发育粉砂岩,储层主要分布在中-细粒砂岩中。颗粒分选中等-较好,磨圆度较差,以次棱角状为主。砂岩孔隙度主要分布在4%~15%,储层孔隙度平均为8%~10%,一般低于12%,孔隙度下限为7%左右;渗透率主要分布在 $(0.05 \sim 1) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,一般低于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,储层渗透率下限为 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右。储层类型以孔隙型为主,属于典型的低孔低渗致密储层。储层的典型测井响应特征表现为“三低二高”:即低自然伽马、低中子、低密度、高声波、中-高电阻率。沉积环境是控制储层分布及物性变化的首要因素,分流河道物性最好,其次是河口坝,而决口扇、河漫滩、分流间湾和砂泥坪的物性较差。

1.2 河道砂岩储层预测难点

川西坳陷侏罗系岩性气藏往往具有以单河道为储渗单元的特征,单河道和单砂体构成多个独立的子气藏。气藏开发需要以单河道或单砂体为单元,即使同一层段内的不同河道,与烃源断层配置条件及圈闭条件、沉积微相、储层特征等差异,均会导致其含气丰度、

产能特征的明显差异。但伴随勘探开发的深入,对叠置河道的精细剖分,河道外形及河道内部物性非均质性刻画与描述等提出了越来越多的需求,带给地球物理预测的难点主要体现在:

1) 河道沉积层序识别

河道砂体纵向叠置情况复杂,砂体横向变化快,厚度薄,单砂体厚度一般为5~20 m,而地震资料主频为25~35 Hz,可分辨储层的厚度为25~30 m,可检测储层厚度为15~20 m。受地震资料分辨率限制,同一相位内往往发育多条叠置河道,传统以相位为单元的单属性相带刻画技术手段受限,叠后提高分辨率处理亦难以完全适应薄层窄河道识别需求,河道期次识别难度大。

2) 河道砂岩叠置样式预测

河道砂岩纵向上往往叠置,不同储层叠置区域开发井网部署及水平井轨迹设计方案不同。而夹层厚度与砂岩储层厚度差异及砂体发育层数不同均会导致地震响应差异,在砂岩频繁叠置情况下,地震子波旁瓣干涉效应对地震反射能量影响会明显增加,常规以能量为核心的预测方法常难以满足不同储层叠置样式区域预测的需要。

3) 单河道相带刻画

以振幅为核心的常规属性提取常用于河道外形的刻画^[10],但常规属性分析往往受反射能量影响大,而反射能量往往与储层厚度、夹层及物性相关,识别精度受限。如何准确刻画河道沉积相带边界亦是面临的主要难点之一。

4) 河道砂岩储层预测与定量描述

河道砂岩内部存在岩性及物性非均质性,储层厚度往往较砂岩厚度薄,物性纵横向变化快,加之储层总体较致密,与围岩波阻抗叠置较为严重,地球物理特征隐蔽,定量识别储层厚度及其分布是开发评价及产能建设的主要难点。

2 河道砂岩储层精细刻画技术

河道砂岩储层精细刻画是一个复杂的系统工程,面临沉积层序、叠加样式预测,相带刻画与定量预测描述等难题,不仅需要建立多学科结合的研究思路及技术流程,更需要对单项特色技术进行测试优选并集成配套多种特色的地球物理技术。

本文针对川西坳陷河道砂岩储层精细刻画难点,采用逐级控制的递进式预测思路。首先开展河道沉积层序识别和小层精细对比,基于实际地震地质资料开展河道砂体叠置样式正演,分析河道砂体叠置情况下的地震反射特征,优选出敏感属性参数与属性提取技

术手段;其后综合采用属性分析技术、波形分类技术、体分频像素成像技术和三维可视化技术开展有利相带空间刻画,确定河道砂体内部叠加样式和空间展布特征;最后,在相带预测结果的约束下,重点采用地质统计学反演技术,实现河道砂岩储层定量预测。

2.1 井-震一体化河道沉积层序识别

川西坳陷中浅层气藏不同河道存在成藏配置条件的差异,不同河道天然气产能差异明显。因此,河道单元及河道沉积层序识别是气藏开发方案编制及井网部署的基础。川西坳陷侏罗系蓬莱镇组划分为4个亚段,29套砂组,沙溪庙组划分为2个亚段,9套砂组。砂组划分往往参照地震的可识别性确定,一个砂组对应一个地震相位,厚度一般40~50 m,相当于一个中期基准面旋回层序。一个砂组往往由多个米级厚度的单砂体或小层组成,单砂体或小层往往为受控于短期基准面旋回的河道沉积。气藏针对河道单元的开发面临几个主要问题:①单个地震相位之内如何准确识别多期河道(图1a);②钻井砂体对比时如何划分单砂体沉积期次(图1b);③如何判断不同钻井砂体是否属于同一河道(图1b)。

开展井-震一体化研究,精细捕捉河道沉积在地震资料纵向上的响应,可识别单一地震相位之内多期单河道沉积层序,提高地震资料空间上识别河道砂体能力,具体做法主要包括:砂组划分及小层对比井-震一体化和单河道识别及河道沉积演化分析井震一体化。

首先,通过井-震对比剖面联合识别单一地震相位内砂体沉积期次。小层精细对比是河道砂体预测的基

础^[11],连井小层精细对比的准确性可以通过地震的约束得以明显提高,解决地震分辨率不够的问题。如图1b所示,川西坳陷什邡地区侏罗系蓬莱镇组(Jp_3)砂组内部发育3~4个河道沉积旋回,单井砂体横向变化快,准确对比难度极大。通过地震精细标定、连井对比和后续平面分析则可逐步识别小层对应关系,地震及连井砂体对比剖面上可见:①号砂体相位最靠下,为早期沉积河道砂;④号砂体相位位于最上部,为最晚期沉积河道砂;②号砂体沉积时间较③号砂体略早。因此,通过井震砂体对比划分出4期砂体,沉积序次从早到晚依次为①—②—③—④。

其次,连井及地震剖面与河道刻画平面图相结合落实河道分布及走向。仅仅是连井地震剖面及砂体对比剖面尚难以明确发育了几条河道。不同钻井揭示的砂体是否属于同一河道?剖面与平面结合的井-震一体化河道识别及沉积演化分析是单河道准确识别的另一个必不可少的手段。 Jp_3 砂组沉积物源来自北东向,图2是针对 Jp_3 砂组所在相位进行地震均方根振幅属性分析结果。砂组沉积期发育多条北东-南西向河道,但河道叠置严重,单从该振幅属性图上亦很难准确识别各期河道走向,但结合地震剖面及连井砂体对比剖面信息则可以准确判断河道走向及沉积层序。综合识别结果:①号河道为第一个短期旋回沉积,河道北东走向,L46井钻遇;②号河道为第二个短期旋回沉积,河道南北走向,L23井钻遇;③号河道为第三个短期旋回沉积,河道东西-北东走向,L31和XP21-1井钻遇;④号河道为最后一个短期旋回沉积,河道北北东走向,L110,L36,XP21-2和L30井4口井钻遇。

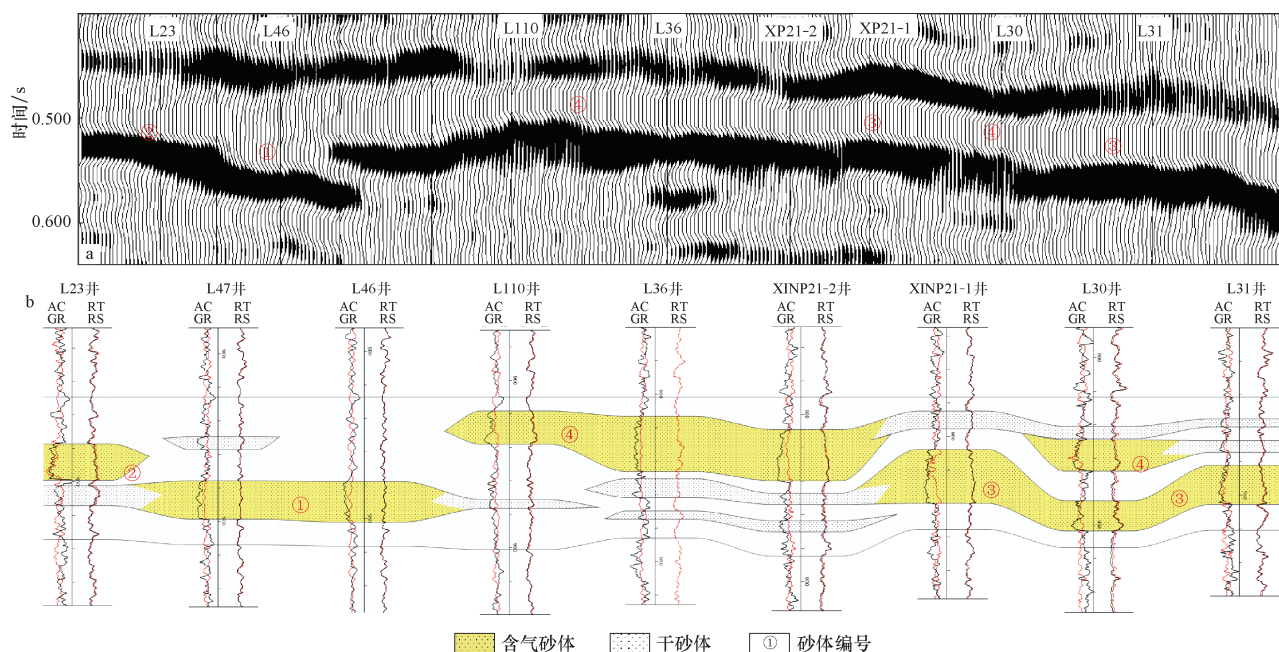


图1 川西坳陷什邡地区 Jp_3 砂组连井地震剖面(a)及砂体对比剖面(b)

Fig. 1 Seismic cross section (a) and correlation section of sand bodies (b) for Jp_3 in Shifang area, western Sichuan Depression

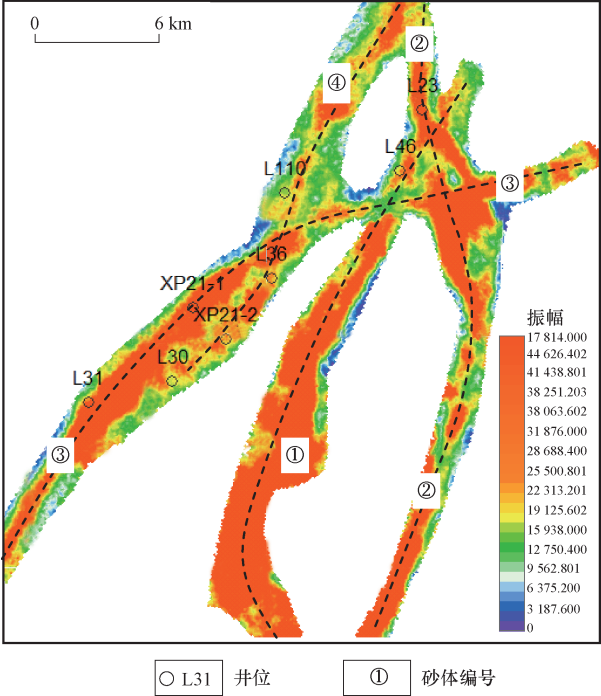


图 2 川西坳陷什邡地区 Jp_3 砂组河道砂岩储层振幅属性
Fig. 2 Seismic amplitude attribute of Jp_3 channel sand reservoirs in Shifang area, western Sichuan Depression

2.2 河道砂体叠置样式正演

确定砂岩储层纵向叠加样式是气藏开发又一重要需求。叠置砂体模型正演模拟是建立储层识别标志、提出预测模式及方法的关键步骤。模型正演主要根据储层与围岩厚度变化、声波及密度测井资料、地震资料

主频及相位特征选取子波获得相应的正演记录^[12]。河道砂体发育过程往往具有继承性,伴随河流摆动,河道砂沉积往往存在侧向迁移,纵向叠加样式多变,而纵向多个薄层干涉影响非常普遍,不同岩性组合、不同厚度变化组合、不同地震波主频带来不同的叠置砂体的地震响应,因此需要根据实际情况制作多层叠置砂体模型以建立识别标志,提出针对性预测方法。

以新场沙溪庙组 Js_2^2 气藏为例,该砂组对应一个地震波谷相位,部分区域存在 S1 和 S2 两套单砂体叠置情况,单砂体厚度 5 ~ 25 m,砂体间泥岩夹层厚度一般在 20 m 以内,厚薄不均,实际砂体预测方法测试发现,振幅属性与砂体累计厚度关系不明,难以准确刻画单砂体分布区和叠置砂体分布区。

图 3 是 Js_2^2 砂组连井砂体对比剖面、正演记录及实际过井地震剖面,剖面位置如图 4 蓝色线所示,模型参数如表 1 所示。从连井的砂体对比剖面上看,共有 3 个砂体尖灭点:S2 砂体左尖灭点、砂体叠置部分 S1 砂体左尖灭点和砂体叠置部分 S2 砂体右尖灭点。从连井正演结果看,S1 和 S2 砂体左侧尖灭位置出现相位突变,S2 右侧尖灭点的位置出现相位反转,砂体叠置部分波形变宽、振幅略变弱,但不明显。连井地震剖面的相同位置也出现了相同相位突变地震响应。这就证实了相位突变的地震响应就是叠置砂体边部单砂体尖灭的地震响应,表明河道砂岩纵向叠置样式变化对波形影响较对能量的影响更为明显,这为后续采用基于波形分析的砂体叠置区预测提供了依据。

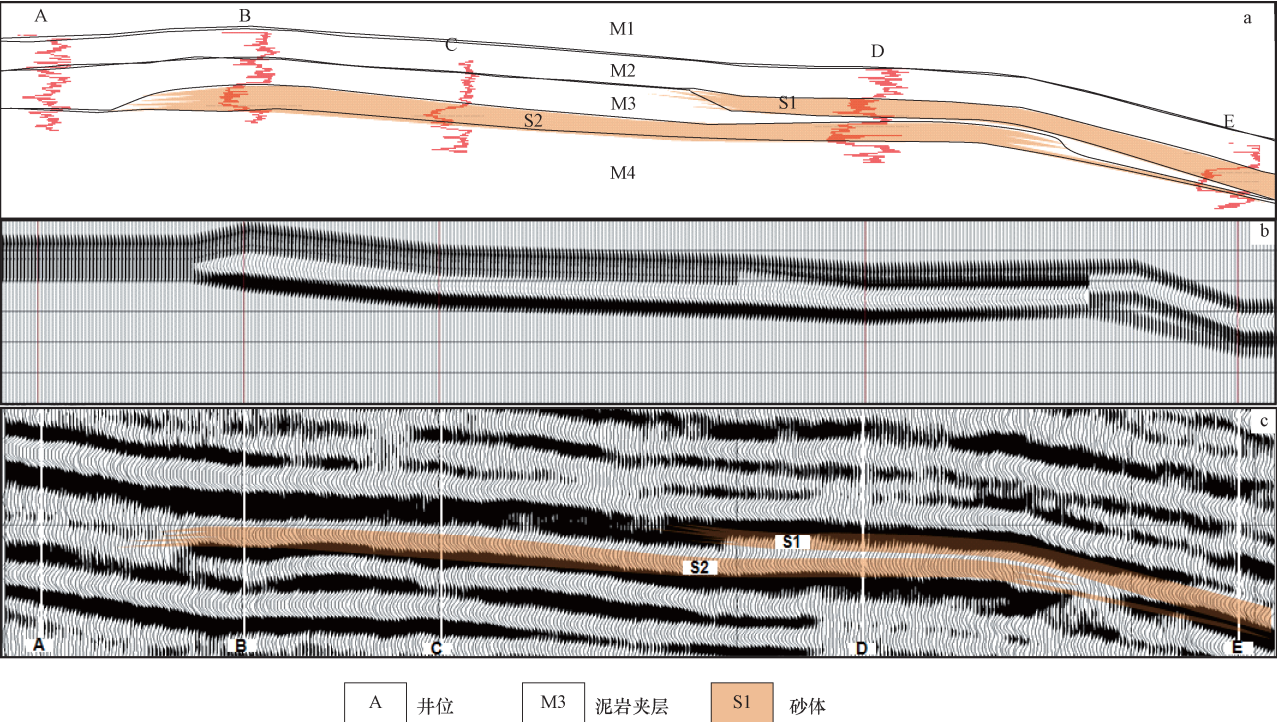


图 3 川西坳陷新场 Js_2^2 砂组连井砂体对比剖面(a)、正演记录(b)和地震剖面(c)
Fig. 3 Correlation section of sand bodies(a), forwarding record(b) and seismic sections(c) of Js_2^2 in Xinchang area, western Sichuan Depression

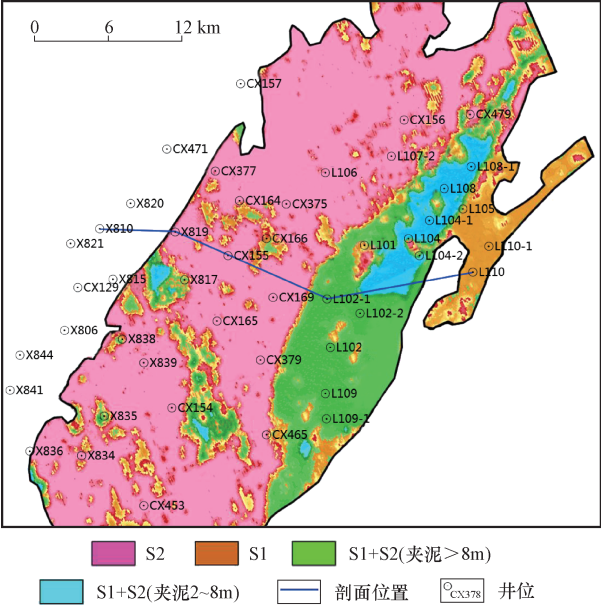


图4 川西坳陷新场地区 $J_2^{s_2}$ 河道砂岩储层波形分类
Fig. 4 Wave form classification of $J_2^{s_2}$ in Xinchang area, western Sichuan Depression

表1 川西坳陷新场地区 $J_2^{s_2}$ 砂组叠置砂体模型各岩性体参数
Table 1 Parameters of stacked sand model of $J_2^{s_2}$ in Xingchang area, western Sichuan Depression

岩性类别	纵波速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	砂体厚度/m
S1 砂岩	3 833	2. 47	5 ~ 25
S2 砂岩	3 862	2. 48	5 ~ 25
M1 泥岩	3 800	2. 40	—
M2 泥岩	4 100	2. 50	30
M3 泥岩	4 150	2. 50	30 ~ 40
M4 泥岩	4 350	2. 60	—

2.3 相带空间刻画技术

2.3.1 沿层属性提取

在储层精细标定和追踪对比的基础上,进行三维沿层切片分析及属性参数提取是河道储层刻画最为普遍采用的技术,提取的参数包括振幅、频率、波阻抗、相干等若干种属性^[13-14]。川西坳陷侏罗系河道砂体以高孔隙度的低阻抗砂体物性好,为主要开发目标,利用振幅变化,尤其是强波谷振幅变化可较好刻画河道相带分布(图2,图5)。此外,由于振幅属性容易受到围岩变化及地震波干涉效应影响,利用波阻抗属性,对于刻画有效河道储层效果更加明显。振幅及波阻抗属性分析是目前川西地区最为常用的河道相带预测方法。

2.3.2 波形分类技术

针对上文单砂体及叠置砂体分布区预测,采用波

形分类技术。波形分类是一种利用自组织神经网络技术(SOM)对地震道波形进行自动分类的技术。其工作原理是基于对相同地质特征的地质体具有相似的地震波形反射的假设。波形分类首先需要确定样本波形的位 置,该波形位置通常选择典型井的位置,并赋予该样本波形一定的地质含义(典型井储层的地质属性)。在一定的时窗范围内计算其他位置的地震波形与样本波形的相似程度。对于与某一样本波形具有高相似性的地震道波形被认为与该样本波形为同类波形,从而认为该地震道波形与样本波形具有相同的地质属性^[15]。

利用波形分类结果可以刻画河道内部非均质性,反映河道储层叠置关系差异。图4为新场气田 $J_2^{s_2}$ 砂组波形分类结果,分别选择了图3中A井、B井、C井、D井和E井在 $J_2^{s_2}$ 砂组位置的波形作为学习样本,并将样本赋予不同的地质含义。如A井代表无储层发育的波形样本,B井和C井波形代表单S2砂体发育的波形样本,D井波形代表双砂体发育但具有厚泥岩夹层(10 m)的波形样本,E井子波代表单S1砂体发育的子波样本。分析其他地震道的波形与这五个样本波形的相似性,以达到波形分类的目的。图4直观地反映了 $J_2^{s_2}$ 砂组两套砂体的叠置情况和主要的沉积相带的展布,河道砂体主要呈北东向展布,横向摆动继承性明显,在河道展布东侧出现叠置情况。图中粉红色区域为S2单砂体发育区、青色及绿色区域为S1及S2两套砂体叠置区,统计区内钻井表明,叠置区泥岩夹层厚度大小可以半定量表征,其中绿色对应泥岩夹层厚度大(>8 m),青色泥岩夹层厚度小(2~8 m),橙色区域为S1砂体发育区,所预测的砂体叠置特征、泥岩夹层厚度趋势与连井剖面上的钻井砂泥叠置情况吻合极好(图3),后续开发井证实了砂组内单砂体叠置关系预测的准确性,对于后续开发井网针对S1砂体的部署调整发挥了关键作用。

2.3.3 体分频像素成像技术

常规地震振幅和频率属性一直是前期河道砂岩储层识别与刻画的主要属性。近年来,新区勘探开发面临的目标储层地球物理特征隐蔽性越来越强,预测难度加大,且随着勘探开发程度的提高,对预测刻画精度要求越来越高。该类常规属性分析手段在川西地区越来越难以满足河道砂岩储层精细刻画的要求,而利用分频技术刻画河道外形可取得明显效果^[16-20]。分频解释技术对三维地震资料进行特殊处理,产生具有单一频率的一系列的振幅调谐体和离散频率能量体,采用单频属性进行三原色平面融合,相带识别能力得到提高,但单频信噪比较低,影响刻画效果。

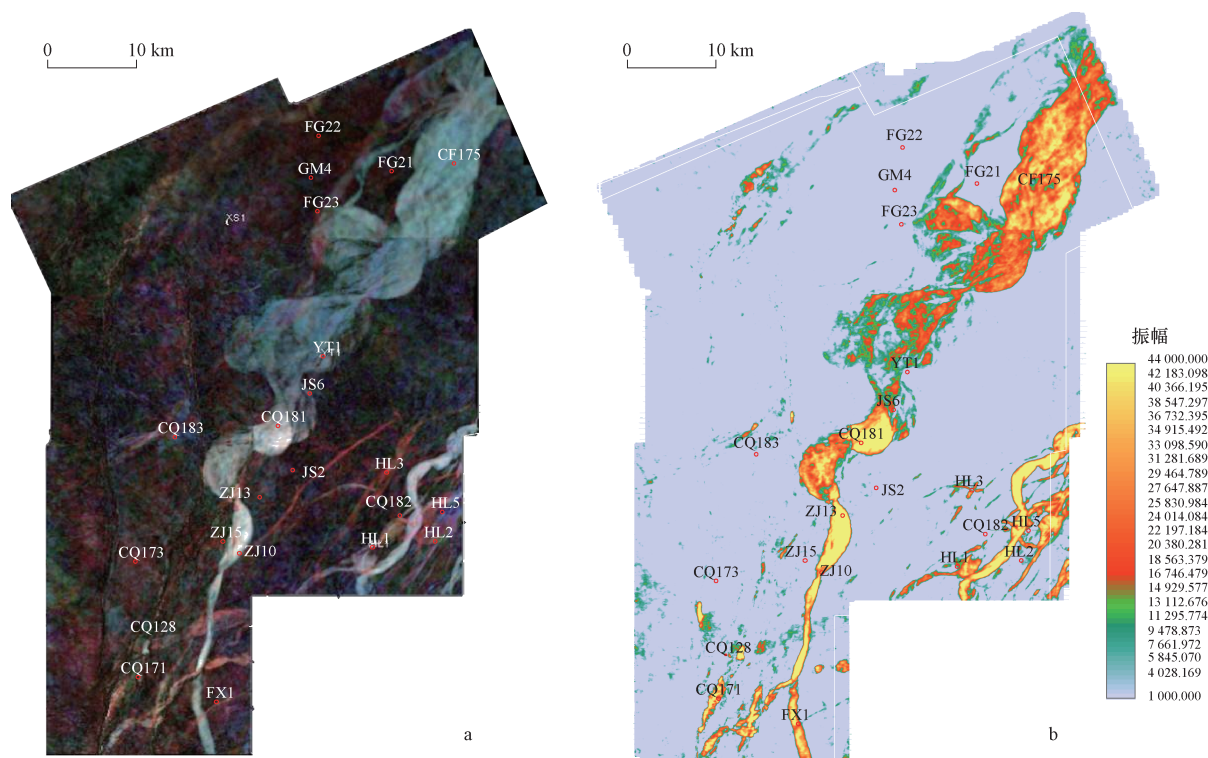


图5 川西坳陷高庙一中江地区沙溪庙组 J_s^4 砂组体分频像素成像(a)与振幅属性(b)对比

Fig. 5 Pixel imaging for spectral decomposition(a) and seismic amplitude attributes(b) of J_s^4 in Gaomiao-Zhongjiang area, western Sichuan Depression

采用的体分频像素成像技术刻画相带边界效果明显,该技术是像素成像去噪处理与体分频融合处理两项技术的联合运用。首先对三维地震数据进行像素去噪,利用三维像素处理功能,采用各向异性滤波技术,通过反复迭代,无限逼近方法,消除三维地震数据体内的系统噪声和随机噪声,从而达到提高地震资料信噪比,突出有效地震反射波的目的,使得地质异常体边界反射更加清晰,便于识别。在此基础上开展体分频处理,利用小波变换把地震反射成分中的各频率对应的调谐能量分解出来而形成对应频率的能量异常体,赋予每一单频体一种颜色(通常是红、黄、蓝色中的一种),单频体内不同采样点处依据能量差异赋予此点同种颜色不同的亮度和饱和度,最后将各单频体同一点处不同颜色的亮度和强度按照三原色光模式(RGB)混合得到对应的颜色值,融合形成属性体,这较早期分频技术分别形成单频体,通过平面图融合的方式前进了一大步。这种处理方法与卫星遥感技术采用不同带宽频率对地表地形地物扫描产生的干涉图相解释方法相类似,可实现地质体外形整体刻画,使相带连续性、相带边界刻画能力较常规属性明显提高。

体分频像素成像技术对成都凹陷东部斜坡高庙-中江地区沙溪庙组 J_s^4 河道外形及边界刻画较常规振幅取得了明显效果(图5)。该层埋深1 900 m

左右,砂体厚度10~30 m。首先对目的层段的地震数据进行全频(0~80 Hz)段扫描,确定地震主频范围位于20~50 Hz,选用具有代表性的25、35和45 Hz对应的调谐振幅体,分别用红、绿、蓝三色叠合,颜色的强弱对应着调谐振幅的高低。从图5左图浅白色对应河道砂体刻画结果看,具有典型曲流河道特征,结合区域沉积地质背景分析,该河道物源来自北部米仓山地区,图区内北部高庙地区主要地貌为较平缓的三角洲平原曲流河道沉积,南部中江地区河道变窄、河道弯度降低,体现出逐渐向三角洲前缘过渡的特点。利用振幅属性,亦能刻画河道的大致轮廓,但相带边界、内幕相带结构刻画和相对弱振幅区细小河道成像方面,体分频像素成像技术优势明显,在河道变宽的边滩沉积部位,明显可以看到多期边滩砂体侧积特征,边滩砂体沉积边界成像较振幅属性明显提高。此外,利用体分频像素成像技术及振幅属性刻画相带内物性非均质性特征成效依然明显,河道内分频成像亮点区和强振幅区域往往发育物性较好的砂体或厚度较大的砂体,开发建产效果明显好于亮度较低、振幅相对较弱的区域。

2.3.4 三维可视化技术

三维可视化技术是精细刻画河道三维空间分布的重要工具^[6-7],在小层追踪对比线的控制下或种子

点控制下,可自动进行储层的三维空间识别和追踪,并对满足条件的样点进行识别(也称为储层雕刻),实现储层三维空间展布的刻画。通过该技术的创新应用,重点结合沉积微相研究成果对追踪出的河道砂岩储层的空间分布进行地震沉积学分析,认为该技术尤其是在河道纵横向叠置的情况下,准确区分河道走向、划分河道期次方面较常规属性分析有非常明显的优势。

图6为中江地区沙溪庙组纵向叠置和横向频繁迁移的多河道剖面特征及刻画结果。从地震剖面上可见(图6a),河道纵向叠置频繁,常规的剖面河道等相位追踪拾取难度大,大时窗内三维可视化解释工作效率及刻画精度均得以提高。首先针对河道所在剖面位置进行大时窗分频像素成像,确定5条主要河道宏观分布及走向特征(图6d);其次,针对每一条河道实施种子点控制与自动追踪成像,不同期次河道用不同颜色表示(图6b),从而将原本交叉叠置的②号、③号和④号河道在空间上有效分开;在此基础上,不同期次河道地震反射时间表征也有助于进一步认识河道发育期次,时间埋深大的河道沉积时间最早,图6c可以看出①号河道埋深最大,其次为②号和③号河道,④号和⑤号河道埋深相对较浅。通过平面叠置河道外形控制、单河道追踪、纵向时间刻画结合剖面解释,多套河道砂体相互叠置关系以及空间展布形态刻画效果较好,发育时间顺序亦非常清晰,5条河道按编号序次发育。

2.4 递进反演相控储层定量描述技术

川西坳陷陆相致密砂岩储层厚度薄、储层物性横向变化快,定量描述储层厚度、物性横向变化是开发产能建设的客观需求。为实现储层定量描述地质目标,

将相带约束基础上之上的高精度反演作为储层定量描述的攻关思路,形成了递进反演相控储层描述技术,采用稀疏脉冲波阻抗反演和地质统计学岩性反演、孔隙度模拟三者递进结合思路,把常规的地震体转换成多个高分辨率的反演属性体,把界面型的地震数据转换成波阻抗、岩性和孔隙度数据,直接反映储层特征,使其能与钻井、测井直接对比,最后根据相带识别成果,实现优势相带内储层厚度及物性的定量预测和描述,研究储层特征的空间变化。在解决川西横向非均质性很强的岩性油气藏描述问题中效果明显。

根据测井分析结果,优质储层主要位于低波阻抗区域,且储层孔隙度和波阻抗相关性较好,所以开展高精度的叠后反演是可以有效支撑储层厚度和孔隙度预测的。首先开展波阻抗反演,该反演主要采用保真度较高的稀疏脉冲反演(CSSI)方法;然后以波阻抗反演结果为约束,开展地质统计学岩性反演,而该方法在井网密集的情况下有明显的优势;基于地质统计学波阻抗反演结果和岩性反演结果,在砂岩储层内部,进行孔隙度协模拟,最终获得孔隙度反演成果^[21-24]。

图7为什邡地区蓬莱镇组气藏地质统计学模拟的连井岩性剖面。其中,黄色为砂岩,绿色为泥岩,剖面曲线为GR曲线。剖面岩性分辨率高,井点岩性反演结果同参加反演约束的实钻井砂体发育情况吻合,同检验井岩性反演结果吻合,反演结果可靠性较高,克服了常规地震剖面分辨率不足的缺点,为砂体厚度预测提供了基础。图8为连井孔隙度剖面,红黄色为高孔隙度储层,蓝色曲线为孔隙度曲线,红色为GR曲线,曲线与剖面对应好。剖面上,不同厚度储层得以展示,这为储层厚度及物性预测提供了基础,为储层量化预测实现了关键的一步。

在岩性剖面上,依据储层反射层位向下开时窗,可

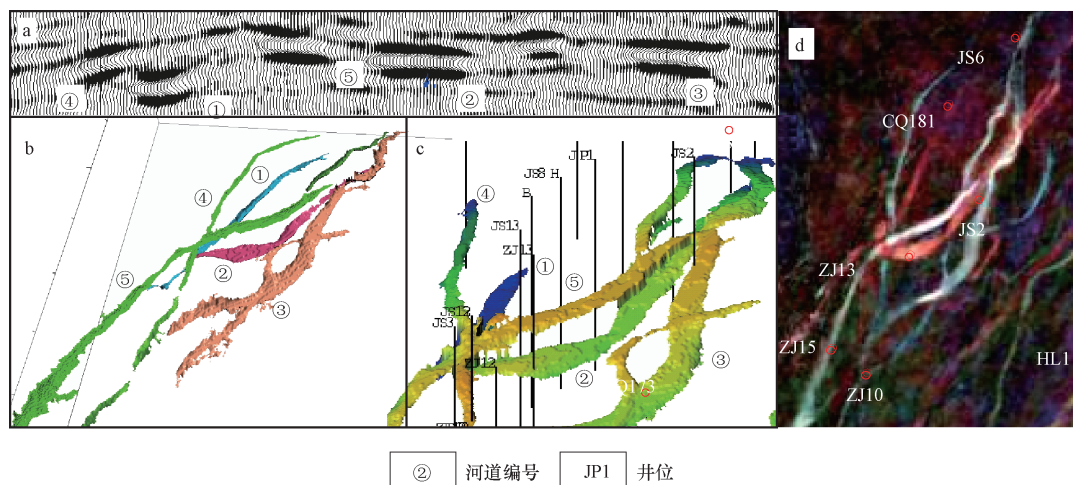


图6 川西坳陷中江地区沙溪庙组 J_{s1}^I 砂组地震剖面(a)、三维可视化(b,c)与体分频像素成像(d)

Fig. 6 Seismic section(a), 3D visualization(b,c) and pixel imaging for spectral decomposition(d) of J_{s1}^I

in Zhongjiang area, western Sichuan Depression

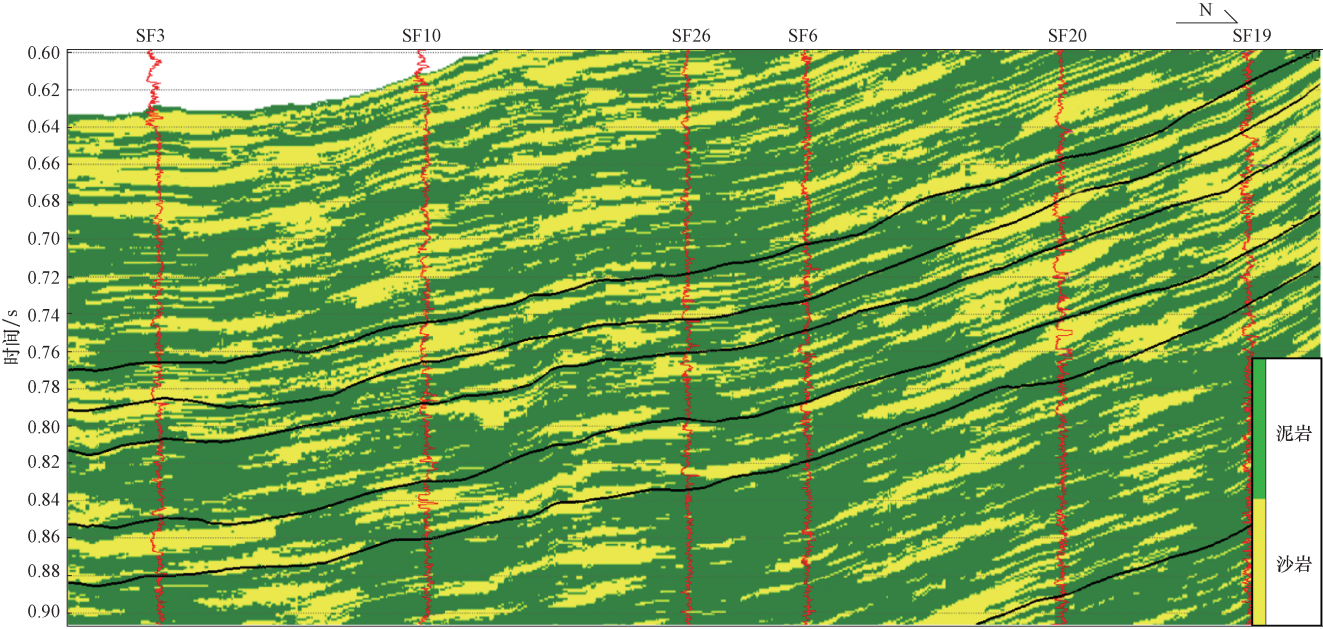


图7 川西坳陷什邡地区蓬莱镇组地质统计学反演的连井岩性剖面

Fig.7 Well-cross section from geostatistical inversion of the Penglaizhen Formation reservoirs in Shifang area,western Sichuan Depression

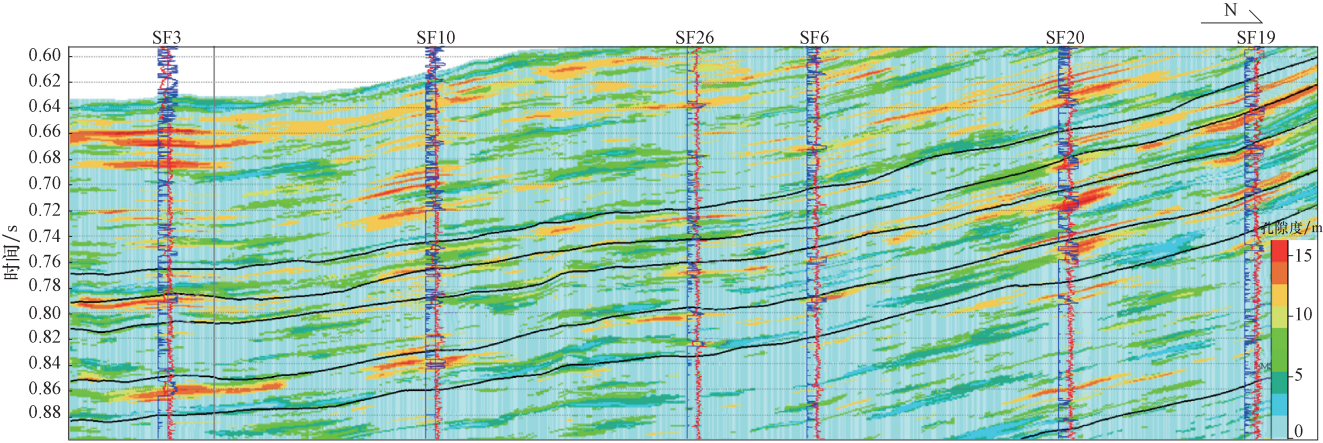


图8 川西坳陷什邡地区蓬莱镇组地质统计学模拟的连井孔隙度剖面

Fig.8 Cross-well porosity section from geostatistics modeling of the Penglaizhen Formation reservoirs in Shifang area,western Sichuan Depression

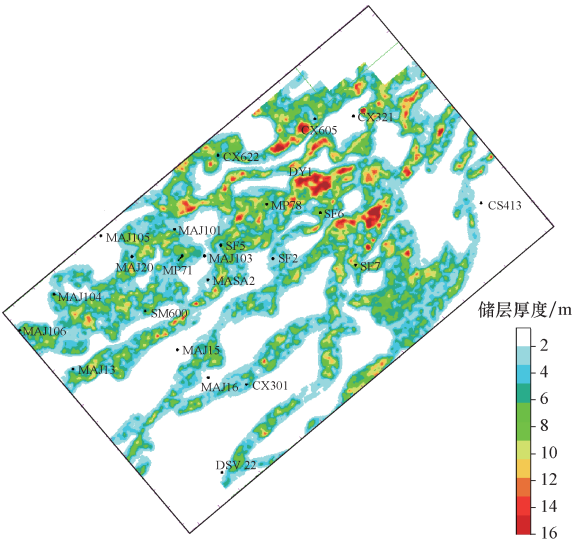


图9 川西坳陷什邡地区 Jp_2^3 有效储层(孔隙度>7%)厚度

Fig.9 Effective thickness of Jp_2^3 reservoirs in Shifang area,western Sichuan Depression

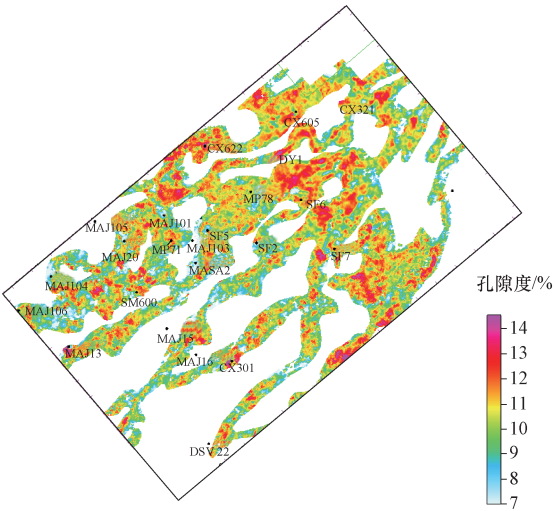


图10 川西坳陷什邡地区 Jp_2^3 储层平均孔隙度

Fig.10 Average porosity of Jp_2^3 reservoirs in Shifang area,western Sichuan Depression

以求得砂体时间样点厚度。在孔隙度剖面上,依据储层反射层位向下开时窗,可以求得不同孔隙度储层的时间样点厚度。以地震相带刻画结果为约束,在优势主河道相带内,进行钻井砂体、不同孔隙度储层厚度校正,获得砂体厚度图、储层厚度图、平均孔隙度图等满足气藏描述及储量计算、开发井网部署等需求的各类图件(图9,图10)。

基于稀疏脉冲波阻抗反演与地质统计学反演相结合的递进反演相控储层定量描述技术,以相带预测为约束、有效实现地震资料横向分辨率与钻井资料纵向分辨率结合,分辨率更高,对于薄层识别能力更强,是高精度储层量化预测的有效工具,适宜于开发阶段气藏描述。但地质统计学反演受井网、模型、反演参数等影响,依然具有一定多解性,需要不断结合开发进展,优化预测模型,不断提升预测精度。

3 应用效果

受研究区地质特征差异影响,储层地球物理响应特征不同,不同技术在不同区块应用效果存在差异,应针对不同区块优选配套关键技术。预测成果在气藏开发评价及产能建设方案编制、针对单河道的井网部署及不同井型井轨迹设计中发挥了关键性支撑作用,一方面,预测符合率及钻井成功率高,主河道砂体预测符合率大于95%,Ⅰ类、Ⅱ类优质储层预测符合率大于90%,开发井成功率大于95%;另一方面,开发及评价建产效果明显,通过川西坳陷侏罗系岩性气藏河道砂岩储层精细刻画,不仅为老区井网调整提供了重要依据,稳产效果明显,在斜坡及凹陷新区开发建产也取得了重要突破,发现并落实什邡-广金蓬莱镇组气藏和中江-高庙沙溪庙组气藏两大建产阵地,获产层系主要有蓬莱镇组 Jp_2^2 、 Jp_2^3 、 Jp_2^5 、 Jp_3^3 、 Jp_3^{7+8} 、 Jp_3^9 、 Jp_3^{10} 、沙溪庙组 Js_1^1 、 Js_1^4 、 Js_2^4 、 Js_3^3 等累计10余套砂组,近20个小层,2012—2014年动用储量 $330 \times 10^8 \text{ m}^3$,新建成年产 $15 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的天然气产能,气藏开发由正向构造带成功拓展到斜坡区及凹陷区,实现川西坳陷侏罗系陆相致密气藏开发新跨越。

4 结论

1) 相控预测思路应贯穿于河道砂岩储层预测与刻画过程始终,采用从河道相带外形及内幕刻画到河道相带内储层厚度及物性递进预测策略,可有效减少储层预测多解性,提高预测精度。

2) 河道砂岩储层纵向叠置与横向迁移频繁,准确识别河道沉积层序、刻画河道外形及叠置样式,开展定

量描述是油气藏开发需要解决的重要基础性课题,本次井-震一体化河道沉积层序识别、河道砂体叠加样式正演、相带空间刻画技术和递进反演相控储层定量描述等方法技术对于河道砂岩储层气藏开发阶段精细刻画有重要参考作用。

3) 不同区块地质特征不同,储层地球物理响应特征各异,并非每一单项技术适用于各个区块,针对研究目标优选预测方法技术手段是河道砂岩储层预测过程中需要重视的问题之一。

参 考 文 献

- [1] 龙胜祥,肖开华,李秀鹏,等. 四川盆地陆相层系天然气成藏条件与勘探思路[J]. 天然气工业,2012,32(11):10-17.
Long Shengxiang, Xiang Kaihua, Li Xiupeng, et al. Gas accumulation conditions and exploration strategies of Mesozoic terrestrial strata in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(11): 10-17.
- [2] 杨克明,朱宏权. 川西叠覆型致密砂岩气区地质特征[J]. 石油实验地质,2013,35(1):1-8.
Ye Keming, Zhu Hongquan. Geological characteristics of superposed tight sandstone gas-bearing areas in western Sichuan[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(1): 1-8.
- [3] 谢刚平,叶素娟,田苗. 川西坳陷致密砂岩气藏勘探开发实践新认识[J]. 天然气工业,2014,34(1):6-15.
Xie Gangping, Ye Sujuan, Ye Sujuan, Tian Miao. New understandings of exploration and development practices in tight sandstones gas reservoirs in western Sichuan Depression[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(1): 6-15.
- [4] 唐宇,吕正祥,叶素娟,等. 成都凹陷上侏罗统蓬莱镇组天然气运移特征与富集主控因素[J]. 石油与天然气地质,2013,34(3):281-287.
Tang Yu, Lv Zhengxiang, Ye Sujuan, et al. Characteristics and controlling factors of natural gas migration and accumulation in the Upper Jurassic Penglaizhen Formation of Chengdu Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(3): 281-287.
- [5] 蒋裕强,漆麟,邓海波,等. 四川盆地侏罗系油气成藏条件及勘探潜力[J]. 天然气工业,2010,30(3):22-26.
Jiang Yuqiang, Qi Lin, Deng Haibo, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration potentials of the Jurassic reservoirs in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2010, 30(3): 22-26.
- [6] 唐建明. 川西坳陷致密非均质气藏储层空间展布刻画[J]. 天然气工业,2002,22(4):19-23.
Tang Jianming. Describing the space distribution of the heterogeneous tight gas reservoirs in west Sichuan Depression[J]. Natural Gas Industry, 2002, 22(4): 19-23.
- [7] 吴朝容,段文燊. 川西坳陷XS地区河道砂体预测研究[J]. 石油天然气学报,2011,33(11):81-84.
Wu Chaorong, Duan Wensheng. Prediction of channel sandstone in XS area of western Sichuan Depression[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(11): 81-84.
- [8] 凡睿,刘力辉,石文斌,等. 元坝西部地区须二下亚段致密砂岩储层预测研究[J]. 石油物探,2015,54(1):83-89.
Fan Rui, Liu Lihui, Shi Wenbin, et al. Tight sandstone reservoir prediction of lower subsection of Xu_2 member in western Yuanba area

- [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2015, 54(1): 83–89.
- [9] 马中高, 张金强, 蔡月晖, 等. 大牛地气田二叠系下石盒子组致密砂岩储层含气性识别因子研究[J]. 石油物探, 2012, 51(4): 414–419.
- Ma Zhonggao, Zhang Jinqiang, Cai Yuehui, et al. Study on gas identification factor of tight sandstone reservoirs in Lower Shihezi formation from Daniudi Gasfield, Ordos Basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2012, 51(4): 414–419.
- [10] 伊振林. 井震联合窄小河道砂体预测方法研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(1): 19–23.
- Yin Zhenlin. Prediction Method of Narrow Channel Sand Body in Well-to-Seismic Integration[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2012, 34(1): 19–23.
- [11] 朱筱敏, 董艳蕾, 胡廷惠, 等. 精细层序地层格架与地震沉积学研究[J]. 石油与天然气地质, 2008, 34(6): 834–840.
- Zhu Xiaomin, Dong Yan lei, Hu Tinghui, et al. Seismic sedimentology study of fine sequence stratigraphic framework[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 34(6): 834–840.
- [12] 曹卿荣, 李飒, 全敏波, 等. 基于地震正演和属性分析技术预测河道砂体[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(4): 70–74.
- Cao Qingrong, Li Sa, Tong Minbo, et al. Channel sand distribution prediction based on seismic forward modeling and attribute analysis technology[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013, 35(4): 70–74.
- [13] 王世瑞, 王树平, 狄帮让, 等. 基于地震属性特征的河道砂体预测方法[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(3): 304–313.
- Wang Shirui, Wang Shuping, Di Bangrang, et al. Prediction of channel sand body based on seismic attributes[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(3): 304–313.
- [14] 金振奎, 时晓章, 何苗. 单河道砂体的识别方法[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(6): 572–575.
- Jin Zhenkui, Shi Xiaozhang, He Miao. Identification methods for single-channel sand body[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(6): 572–575.
- [15] 陈恭洋, 陈玲, 朱洁琼, 等. 地震属性分析在河流相储层预测中的应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2012, 34(3): 1–8.
- Chen Gongyang, Chen Ling, Zhu Jieqiong, et al. Application of seismic attributes analysis fluvial reservoir to prediction[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2012, 34(3): 1–8.
- [16] 叶泰然, 苏锦义, 刘兴艳. 分频解释技术在川西砂岩储层预测中的应用[J]. 石油物探, 2008, 47(1): 72–76.
- Ye Tairan, Su Jinyi, Liu Xinyan. Application of seismic frequency division interpretation technology in predicting continental sandstone reservoir in the west of Sichuan province[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2008, 47(1): 72–76.
- [17] 姜秀娣, 翁斌, 刘亚茹, 等. 分频混色技术在高精度地震解释中的应用[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(2): 882–888.
- Jiang Xiudi, Weng Bin, Liu Yaru, et al. Application of spectral decomposition RGB plotting technique for spectral components in high accuracy seismic interpretation[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(2): 882–888.
- [18] 冯斌, 赵峰华, 王淑华. 地震分频解释技术在河道砂预测中的应用[J]. 地球科学进展, 2012, 27(5): 510–514.
- Feng Bin, Zhao Fenghua, Wang Shuhua. Application of spectral decomposition technique in fluvial sand body prediction[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(5): 510–514.
- [19] 卢秀华. 分频技术在曲流河储层预测中的应用[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(3): 76–80.
- Lu Xiuhua. Application of spectral decomposition technology in meandering reservoir prediction[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(3): 76–80.
- [20] 毕俊凤, 顾汉明, 刘书会, 等. 河道砂体地震响应特征及影响因素分析——以垦东1地区馆陶组上段河道砂为例[J]. 石油物探, 2013, 52(1): 97–103.
- Bi Junfeng, Gu Hanming, Liu Shuhui, et al. Analysis on seismic response characteristics of channel sands and its influence factors: case study of Upper Guantao Formation in KD1 area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(1): 97–103.
- [21] 钱玉贵, 叶泰然, 张世华. 叠前地质统计学反演技术在复杂储层量化预测中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2008, 34(6): 834–840.
- Qian Yugui, Ye Tairan, Zhang Shihua, et al. Application of pre-stack geo-statistics inversion technology in quantitative prediction of complex reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2008, 34(6): 834–840.
- [22] 孙思敏, 彭仕宓. 地质统计学反演方法及其在薄层砂体预测中的应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2007, 22(1): 41–48.
- Sun Simin, Peng Shimi. Geostatistical inversion method and its application in the prediction of thin reservoirs[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2007, 22(1): 41–48.
- [23] 王香文, 刘红, 滕彬彬, 等. 地质统计学反演技术在薄储层预测中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(5): 730–735.
- Wang Xiangwen, Liu Hong, Teng Binbin, et al. Application of geostatistical inversion to thin reservoir prediction[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 730–735.
- [24] 刘俊州, 周小鹰, 王箭波, 等. 地质统计学反演在非均质薄砂岩气藏开发中的实践[J]. 内蒙古石油化工, 2009, (7): 16–19.
- Liu Junzhou, Zhou Xiaoying, Wang Jianbo, et al. Practice of opening heterogeneous thin sand rock gases deposit in geometry statistic inversion[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2009, (7): 16–19.

(编辑 张玉银)