

基于井-震联合的辫状河沉积微相分析

——以鄂尔多斯盆地东胜气田锦77井区为例

李宏涛

(中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206)

摘要: 为了弄清鄂尔多斯盆地东胜气田杭锦旗锦77井区下石盒子组1段(简称盒1段)层序沉积特征,通过岩心、测井和地震等资料研究岩石相测井曲线响应和地震反射特征,结合不同结构砂体地球物理正演结果,总结了盒1段沉积微相、测井相和地震相三相综合响应模式,划分了下石盒子组及其上、下地层各级层序界面,研究了内部沉积微相特征;利用地球物理属性地层切片技术,井-震结合、互为约束,确定了H1-2沉积微相平面展布。研究表明:①根据下石盒子组高频层序格架及砂体分布,将盒1段划分为4个小层。砂体主要分布在H1-1—H1-3小层,每个小层厚15~20 m。②综合盒1段岩性、沉积构造、沉积相标志、垂向组合和砂体分布特征,认为主要为低可容纳空间、物源供给充分、河道不固定的游荡性辫状河沉积,心滩、河道充填和泛滥平原是最主要的三种沉积微相。主要目的层H1-2小层发育近南北向条带状展布的辫状河道3~4条,宽度介于1~8 km,北部河道是心滩微相发育的有利部位。

关键词: 高频层序;井-震结合;地球物理正演;沉积微相平面展布;H1-2小层;锦77井区;东胜气田;鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE121.3

文献标识码: A

Microfacies analysis of braided river deposits based on seismic-to-well ties: A case study of the Jin-77 well block in the Dongsheng gas field, Ordos Basin

LI Hongtao

(Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China)

Abstract: This study aims to identify the sedimentary characteristics of sequences in the 1st member of the Lower Shihezi Formation (hereafter referred to as the He 1 Member) in the Jin-77 well block within the Hangjinqi area, Dongsheng gas field, Ordos Basin. To this end, we investigate the log responses and seismic reflection signatures of lithofacies in the He 1 Member using data from core observations, well logs, and seismic data. In combination with the geophysical forward modeling results of sand bodies with various architectures, we summarize the comprehensive response patterns of sedimentary microfacies, log facies, and seismic facies of the He 1 Member. Accordingly, the sequence boundaries of the Lower Shihezi Formation and its overlying and underlying strata are delineated and the characteristics of their internal sedimentary microfacies are explored. What's more, an integration and mutual constraining of well logs and seismic data is applied to determine the planar distribution of the sedimentary microfacies of the H1-2 sublayer using geophysical attribute-based stratal slicing technology. The results indicate the He 1 Member can be divided into four sublayers based on the high-frequency sequence framework and sand body distribution of the Lower Shihezi Formation. Sand bodies in the member are concentrated in the H1-1, H1-2, and H1-3 sublayers, with each sublayer measuring 15 ~ 20 m in thickness. A comprehensive analysis of lithologies, sedimentary structures, sedimentary facies markers, vertical lithologic assemblages, and sand body distribution characteristics reveals that the He 1 Member consists primarily of wandering braided-river deposit with limited storage space, sufficient supply, and unstable channels, and its main sedimentary microfacies include mid-channel bars, channels, and floodplains. The H1-2 sublayer, as the primary target interval, contains three or four nearly SN-trending braided river channels with widths

收稿日期:2024-08-03;修回日期:2024-12-18。

作者简介:李宏涛(1977—),男,博士、高级工程师,气藏描述与致密气田开发。E-mail: liht.syky@sinopec.com。

基金项目:中国石油化工集团公司科技项目(P23133, P19019-1, P20065-2);国家科技重大专项(2016ZX05002-006)。

ranging from 1 to 8 km. Among these channels, those in the north are identified as favorable sites for the development of mid-channel bar microfacies.

Key words: high-frequency sequence, well-to-seismic tie, geophysical forward modeling, planar distribution of sedimentary microfacies, H1-2 sublayer, Jin-77 well block, Dongsheng gas field, Ordos Basin

引用格式:李宏涛. 基于井-震联合的辫状河沉积微相分析——以鄂尔多斯盆地东胜气田锦77井区为例[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(1): 91-107. DOI: 10. 11743/ogg20250107.

LI Hongtao. Microfacies analysis of braided river deposits based on seismic-to-well ties: A case study of the Jin-77 well block in the Dongsheng gas field, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(1): 91-107. DOI: 10. 11743/ogg20250107.

在鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区东胜气田锦77井区,锦77井在下石盒子组1段(盒1段)试获 $3.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{t}$ 的高产工业气流,该井区提交控制储量超过 $1\,000 \times 10^8 \text{ m}^3$,显示良好的勘探开发潜力^[1-5]。该区盒1段西侧相邻的锦72井区、锦58井区气藏已进行开发,均以低渗致密岩性气藏和构造-岩性气藏为主^[4],沉积微相对储层发育与分布具有重要的控制作用^[4,6]。然而,对于锦77井区目的层的地层与沉积特征,前人尚未开展研究,仅部分学者对锦77井区西侧的锦58井区、锦72井区的沉积特征开展了分析,认为分别发育冲积扇与辫状河沉积^[7-10],提出不同井区沉积特征存在差异。由于整个杭锦旗地区靠近盆地北缘,东西跨度较大,不同区域受古地貌影响,地层厚度和沉积特征不同。前人主要基于井点数据开展盒1段沉积特征研究,并未深入开展以小层为单元的沉积微相平面展布分析。目前杭锦旗地区东胜气田开发井型以水平井为主,研究目标已开始转入小层及单砂体,开展小层级别气藏精细描述必不可少。但锦77井区盒1段多套砂体发育,垂向切割叠置,侧向复杂多变,应用常规小层划分对比方法在锦77井区效果较差^[11]。就低渗致密气藏而言,开发小层单元划分不仅是气藏描述的基础,而且基于高精度小层格架,进行目的层地震属性提取,可以更好地表征地质体的沉积特征^[12-13]。经典层序地层学理论在厚层单元的地层划分对比上取得了巨大成功,Vail(1977)提出地震反射界面通常代表了层理面和不整合面等年代地层界面,其分布的连续性,可反映地层的横向展布^[14],已成为地层对比的关键技术之一,但很少应用于开发(评价)阶段的小层或单砂体级别划分对比。高频层序地层学为小层划分提供新的理论依据,高频层序是指由四级及以上沉积旋回构成的沉积序列^[15-16],其形成的根本原因是受不同规模和级别的米兰科维奇天文周期的控制^[16-17],测井曲线纵向的高分辨率为高频层序研究提供了基础,弥补了取心资料有限的不足。

由于辫状河沉积河道迁移频繁,在钻井较少地区仅依据岩心、测井等信息,开展在地质模式指导下的沉

积微相研究,难以控制河道边界,无法满足精细勘探开发要求。研究显示,通过井-震结合,分析沉积微相与地震属性之间的关系,发挥地震资料的空间连续性优势,可以有效刻画沉积微相边界^[18-20]。但该区地震分辨率较低,1/4主波长 $>40 \text{ m}$,难以描述小层砂体(厚度 $<20 \text{ m}$)的展布。基于地震沉积学理论,绝大多数(超过90%)的沉积体系沉积宽度远大于沉积厚度^[19-21],通过将地震地层学、层序地层学与沉积学有机结合,基于地震信号响应薄层沉积单元的认识而开展的数据驱动研究,突破了地震分辨率的限制^[19-20]。而且,地震属性更加遵循地震原始信息,能够突出地质体某方面的地球物理响应特征,比如振幅类地震属性能够突出波峰或波谷的反射强度,对砂体厚度等信息比较敏感^[22]。地震层属性常以地层切片的方式呈现,在地震地貌学、地震沉积学等领域的应用最为广泛^[22]。因此,对于少井区,利用三维地震的空间连续性及其横向变化敏感性,开展地震-地质多学科融合的沉积微相研究更加可信,是解决少井区沉积微相研究问题的关键手段^[23-24]。

本文基于高频层序界面岩心-测井一致性标定,开展(高频)层序测井识别,结合地震资料的横向连续性,在地震反射约束下,进行小层对比^[25];通过岩相标志、垂向相序等研究,明确本地区目的层沉积微相类型;进一步通过井-震标定,统计井旁道地震反射特征,结合地球物理正演分析,明确有利砂体展布地球物理属性;在高频层序格架约束下,基于相对等时面,利用地层切片技术,提取盒1段H1-2小层的地震属性,井-震一体化综合确定小层单元沉积微相平面展布,为水平井评价及开发部署提供地质基础,研究结果也可作为储层平面分布评价和相控储层地球物理预测提供约束边界,具有重要的理论和现实意义。

1 地质背景

杭锦旗地区位于鄂尔多斯盆地北缘,呈北东高、西

南低,向西南倾的单斜构造形态。区内自西向东发育三眼井、乌兰吉林庙、泊尔江海子3条大断裂,走向主要为东西向和北东向^[26]。东胜气田锦77井区分布在伊陕斜坡构造北部,西邻锦72井区,研究区面积约540 km²(图1中黄色区域)^[27]。

加里东运动晚期,鄂尔多斯北部古阴山隆升褶皱造山,为石炭系和二叠系碎屑岩沉积提供了物源^[27]。石炭系太原组,主要为加里东古侵蚀面上发育的海侵沉积,(含砾)石英砂岩与暗色泥岩互层,间夹薄层碳质泥岩和煤^[28]。山西组沉积期,沉积环境由海相向陆相过渡,主要由砂砾岩、砂岩、泥岩及煤层组成,厚度一般介于50~80 m^[29]。下石盒子组沉积期,南、北差异升降加剧,鄂尔多斯盆地北缘隆升、向南倾斜,古气候逐渐转变为半干旱-干旱,杭锦旗地区主要发育冲积扇-辫状河沉积体系^[30]。下石盒子组在工区内厚度为120 m左右,岩性主要为浅灰色含砾粗砂岩、灰白色中-粗砂岩及浅灰绿色石英岩屑砂岩,间夹灰绿色粉砂质泥岩、红褐色泥岩或杂色泥岩。从下至上发育盒1段、盒2段与盒3段(图1),盒1段是最主要含气储层发育段^[27]。上石盒子组主要发育棕褐色、紫红色等氧化色泥岩,夹杂色砂岩。

2 高频层序格架的建立

高频层序格架内气藏开发单元划分是精细气藏描述的基础,其可靠度和精细度直接决定了气藏描述的准确度。以经典层序及高频层序理论为指导,岩心界面、测井界面和地震界面相互标定,建立高频层序格架。

2.1 三级层序关键界面识别与划分

研究区下石盒子组厚度约120 m,以锦77井为代表,利用钻井岩心观察结果,详细标定测井曲线,根据电测曲线的响应特征,对下石盒子组层序及体系域界面进行识别与划分。下石盒子组可划分为由SB2和SB1顶、底层序界面构成的完整三级层序SQ1(图2)。底界面SB1由下石盒子组下部骆驼脖子砂岩与山西组顶部泥岩构成典型下切冲刷面,界面上、下岩性和岩相标志均有区别,自然伽马、电阻率及三孔隙度测井曲线具有突变,为较易识别的三级层序界面(图2)。三级层序顶界面SB2为上、下石盒子组(P₂s/H)之间界面,为较典型的陆上暴露面,以盒3段上部红褐色泥岩、杂色泥岩为标志。研究区大部分地区盒1段顶部通常发育低阻泥岩层,厚5~10 m,表现为相对高自然伽马值

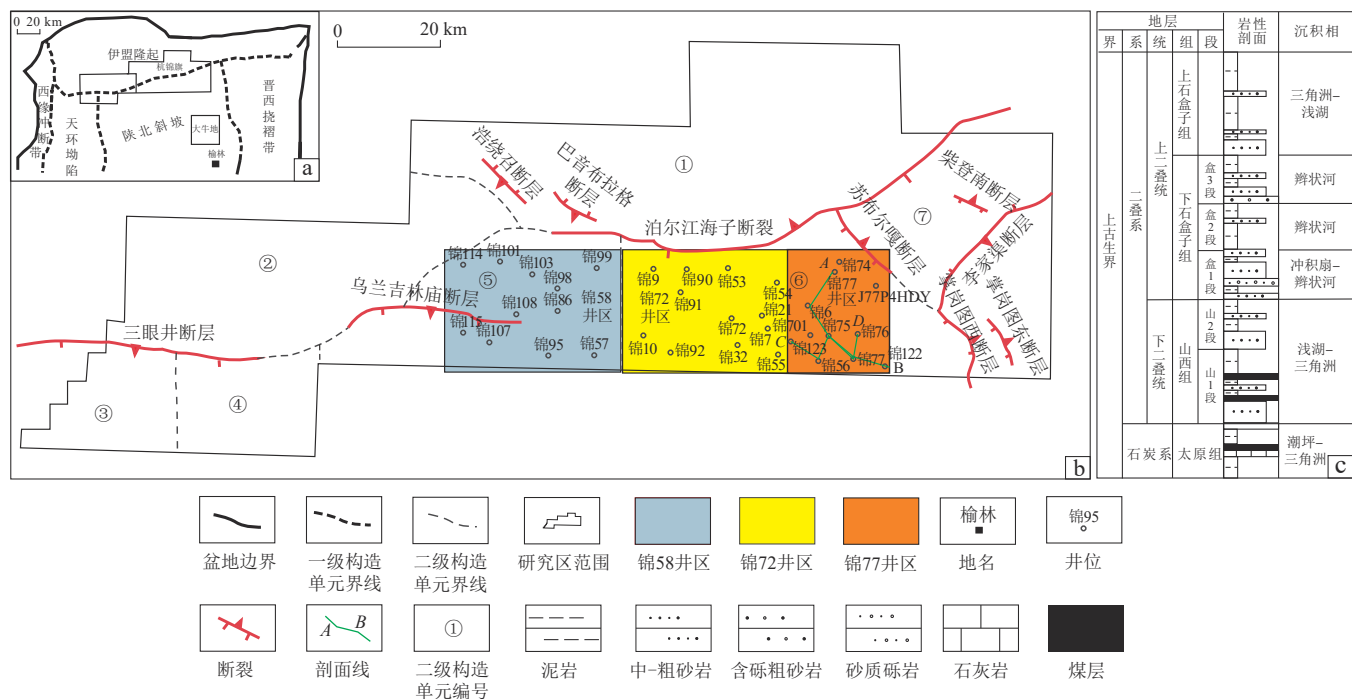


图1 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区构造位置(a)、研究区范围(b)及上古生界地层柱状图(c)(据文献[31])

Fig. 1 Map showing structures and study area location and the stratigraphic column of the Upper Paleozoic strata in the Hangjinqi area, northern Ordos Basin (after reference [31])

①什股豪断阶带;②公卡汗凸起带;③新召西凹陷带;④新召东缓坡带;⑤独贵加汗陡坡带;⑥十里加汗缓坡带;⑦阿镇陡坡带

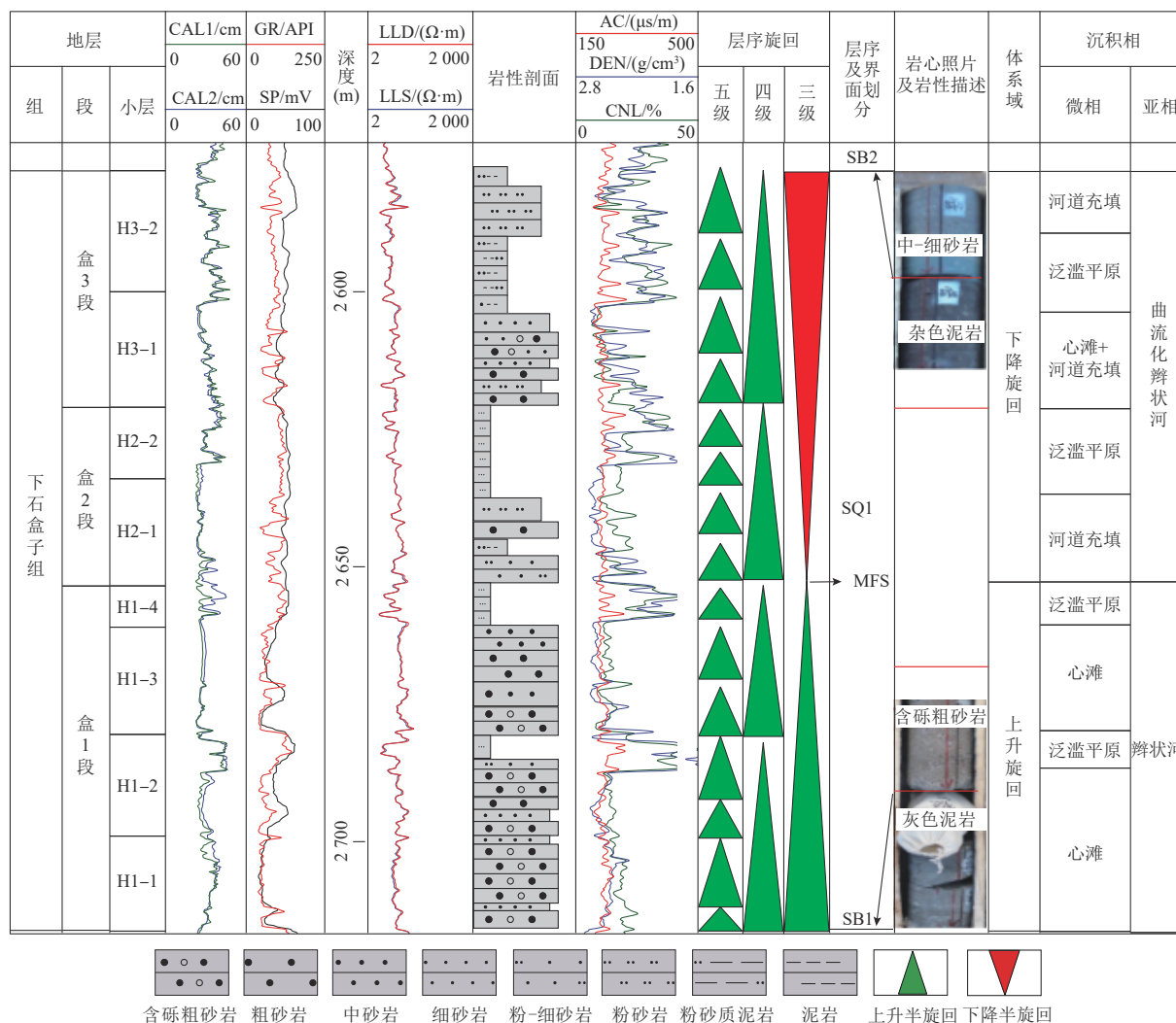


图2 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区东胜气田锦77井区下石盒子组单井(高频)层序与沉积相划分

Fig. 2 Single-well (high-frequency) sequences and sedimentary facies of the Lower Shihezi Formation in the Jin-77 well block within the Dongsheng gas field, Hangjinqi area, northern Ordos Basin
(SB1和SB2为层序边界;MFS为最大海泛面;SQ1为层序1。)

(GR)和中-低电阻率(LLD)的测井响应(图2),为较好的可识别局部标志层。该界面具有明显岩性由粗—细—粗的体系域转换特征(图2),可作为三级层序的体系域界面(MFS)。因此,在该三级层序中,下石盒子组盒1段主要由上升旋回体系域构成,盒2段+盒3段则由下降旋回体系域构成,形成了基本对称的旋回。

通过合成记录精细标定,三级层序的底界面(SB1)地震反射为连续强波峰(T_0^1),为区域地震反射标准层,在地震剖面上表现清晰,研究区内可以连续追踪(图3)。一般认为,杭锦旗大部分地区三级层序顶界面(SB2)在地震剖面上主要呈弱波峰反射特征,但在研究区依据实际井-震标定结果,该界面多数位于零相位处,因此实际追踪的是零相位 T_0^2 (图3)。研究区 T_0^2 波能量和相位变化较大,波组横向稳定性差,识别对比存在一定难度,需要

在石千峰组与上石盒子组之间地震界面(T_0^3)的约束下,按照区域地层厚度变化趋势进行解释追踪。体系域界面为盒1段与盒2段的顶、底界面,在地震上大部分区域可以追踪解释,表现为能量中-弱,呈不连续的波峰-零相位反射(T_0^2)(图3),尽管同相轴存在一定的交叉合并现象,但仍为相对较好的可识别局部标志层界面。

2.2 层序及体系域界面横向对比

进一步根据层序及体系域界面在岩心-测井-地震上和区域范围内的识别难易程度,划分了4个等级,分别为:①稳定易识别的界面,如太原组/奥陶系界面,为风化壳不整合构造层序界面,在岩心、测井以及地震上特征均明显,稳定容易识别。②较稳定易识别的界面,如山西组/太原组界面,为碎屑岩沉积与煤层的界面,岩

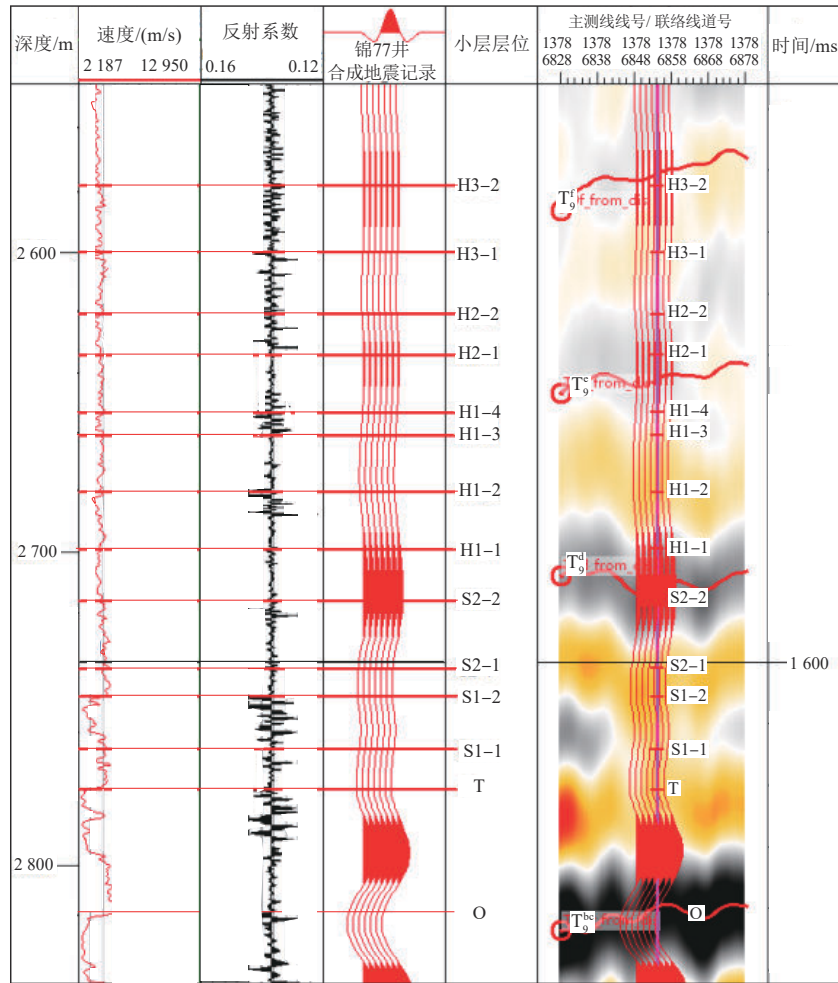


图3 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区东胜气田锦77井合成地震记录

Fig. 3 Synthetic seismograms of well Jin-77 in the Dongsheng gas field, Hangjinqi area, northern Ordos Basin

性和电性上均易识别,但太原组厚度较薄,在地震剖面上识别与追踪困难(图4c)。

③部分较稳定较易识别的界面,如山1段内部S1-2小层底部碎屑岩与S1-1小层顶部煤层的界面,与山西组与太原组的界面相比,横向稳定性明显变差,在地震剖面上仅局部可识别(图4f)。

④局部较稳定可识别的界面,如盒2段相对高阻的碎屑岩层与盒1段低阻泥岩层界面,在井上大部分可识别,地震剖面上也具有断续反射特征(T_9^d)(图4h)。由此建立了层序或体系域界面的岩性-测井-地震综合响应模式,在地震响应模式约束下,开展层序和体系域界面的井间对比(图4,图5)。锦77井区有3个层序界面在地震剖面上比较清晰,分别为石千峰组(P_{2sh})/上石盒子组(P_{2s})、太原组(T)/奥陶系(O)、下石盒子组(H)/山西组(S)的层序界面,与 T_3^s , T_9^{bc} , T_9^d 地震解释层位相对应。有2个局部较稳定可识别的层序或体系域界面,在地震剖面上整体较连续分布,但在局部范围内呈断续分布,在 T_9^{bc} , T_9^d , T_3^s 解释层位约束下可以追踪,分别为 T_3^s 和 T_9^c (图4,图5),1个层序界面在地震剖面上呈短轴状,分

布较为局限(T_9^l)。

基于上述不同级次的层序与体系域界面岩心-测井-地震综合响应模式(图4),作为井间对比重要的参考依据,开展对比追踪^[6],为高频层序对比提供约束格架。具体来讲,首先开展第一级次稳定易识别的层序界面的连井对比;然后在第一级次对比结果约束下,进行第二级次较稳定易识别的层序界面连井对比;最后,在上述两级岩心-测井层序界面对比格架的约束下,结合层序界面地震反射特征和地震层位解释结果,开展第三、第四级别层序界面的井间对比。通过利用地震解释层位间横向变化,对测井上难识别的层序和体系域界面进行约束(如盒1段内部(H1-3/H1-2)、盒3段(H3)/盒2段(H2)等界面)。在追踪对比过程中,将测井识别的层序与体系域界面,和地震剖面上可持续追踪解释的相应界面开展相互约束与验证,避免出现较大矛盾和误差。

2.3 高频层序界面识别与对比

高频层序是指由四级及以上基准面旋回产生的沉

界面级次	界面层序	界面岩心照片	界面测井曲线特征				界面地震响应	对应的地震反射界面	代表井
			GRAP 0 300 CAL/cm 0 40 SP/mV 0 100	DEN(g/cm ³) 2.8 AC(μs/m) 150 CNL% -15	深度 (m) 0 2000 0 2000	LLS(Ω·m) 1.6 LLD(Ω·m) 2 2000			
第一级次 (全区分布稳定的明显层序界面)	a.太原组/下古生界奥陶系							T ₉ ^{bc}	锦93井
	b.石千峰组/上石盒子组							T ₉ ^a	锦72井
第二级次 (全区较稳定易识别的层序界面)	c.山西组/太原组								锦109井
	d.山2段/山1段							T ₉ ^{c1}	锦75井
第三级次 (大部分地区较稳定、较易识别的层序界面)	e.下石盒子组/山西组							T ₉ ^d	锦72井
	f.山1段内部								锦53井
第四级次 (局部分布较稳定、可识别的层序界面)	g.上石盒子组/下石盒子组							T ₉ ^f	锦77井
	h.盒2段/盒1段							T ₉ ^e	锦104井
	i.盒1段内部								锦123井

图4 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区东胜气田锦77井区及邻区上古生界层序界面岩心-测井-地震响应特征及其分类

Fig. 4 Core, logging, and seismic response characteristics and division of the Upper Paleozoic sequence boundaries in the Jin-77 well block and its adjacent area in the Dongsheng gas field, Hangjinqi area, northern Ordos Basin
(岩心样品上红色线为岩性界面;地震剖面上红色为波谷,黑色为波峰,下同。)

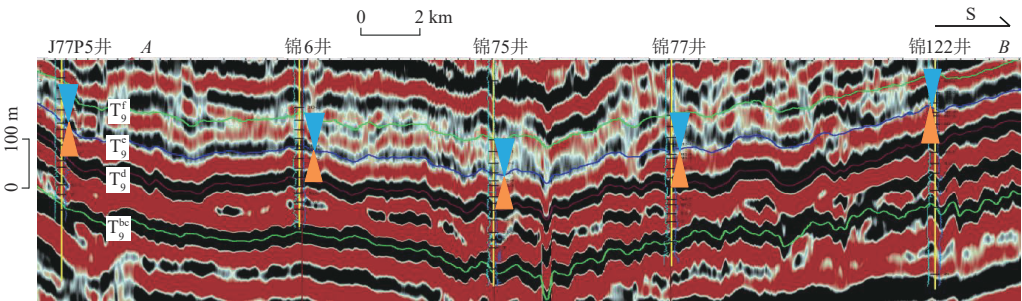


图5 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区东胜气田过J77P5—锦6—锦75—锦77—锦122井井-震标定层序对比剖面(剖面位置见图1b)
Fig. 5 Sequence correlation cross-section with well-to-seismic calibration crossing wells J77P5-Jin6-Jin75-Jin77-Jin122 in the Dongsheng gas field, Hangjinqi area, northern Ordos Basin (see Fig. 1 for the location of section AB)

积响应。四级高频层序形成于米兰科维奇长周期内,与 Brett 的准层序组大致相当;五级高频层序与 Vail 的单层序或 Brett 的准层序大致相当,形成于米兰科维奇短周期^[16, 32-34]。在三级层序界面和体系与界面井间对比结果的基础上,通过详细的岩心岩性界面观察,分析四级和五级高频层序界面的岩性差异、冲刷与侵蚀等,再标定测井曲线,总结其响应特征,为工区内所有井目

的层段高频层序界面的识别与划分提供基础。详细的岩心观察结果表明,本区盒1段高频层序界面主要包括如下几种。

1) 河道冲刷面:为河流侵蚀或下切下伏地层所形成的界面(图6a,c,e),通常是河道形成初期时的产物,岩心上界面岩性通常呈突变,是高频层序识别的重要特征,在研究区较为常见。河道中后期也发育有切割

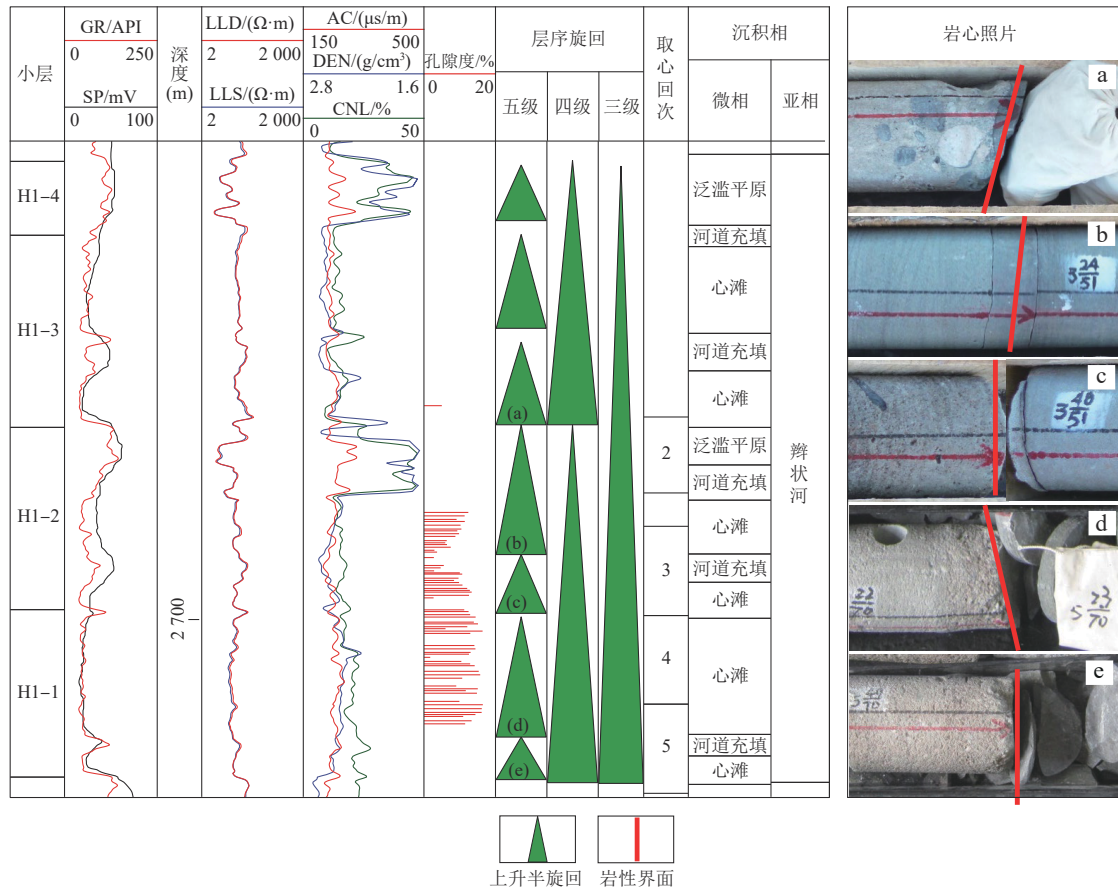


图 6 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区东胜气田锦 77 井高频层序界面岩心与测井曲线特征识别

Fig. 6 Core and logging curve characteristics for the identification of high-frequency sequence boundaries in well Jin-77 in the Dongsheng gas field, Hangjinqi area, northern Ordos Basin

(a)河道冲刷面滞留砾岩与粉-细砂岩的界面;(b)砂岩与粉-细砂岩的界面;(c)河道冲刷面含砾砂岩与下伏细砂岩的界面;(d)粗砂岩与泥质粉砂岩的界面;(e)河道冲刷面含砾粗砂岩与下伏泥岩的界面

(所有岩心直径均为 10 cm。)

砂岩所形成的河道冲刷面,具有河道多期叠置、持续发育的特征。

2) 岩性-岩相转换面:主要是由于沉积基准面与沉降速率之间出现了较明显的差异,导致岩性粒度上呈由粗到细的正韵律结构或由细到粗的反韵律结构,在盒 1 段内部,常见此类高频层序界面(图 6b,d)。

3) 洪泛面:系指由于洪水泛滥作用,基准面上升达最高点位置时形成的弱补偿沉积界面,常以泥质细粒沉积为主,例如盒 1 段 H1-4 小层及 H1-2 小层顶部的泥岩沉积等。

基于上述高频层序界面的岩心识别结果,详细标定测井曲线并总结其测井响应特征,以此划分研究区内所有井目的层段的高频层序。由河道冲刷形成的高频层序界面的测井曲线往往具有较为明显的突变特征,如高值的自然伽马曲线突变为低值,高中子孔隙度突变为低中子孔隙度,低电阻率曲线突变为相对较高电

阻率等。在高频层序内,部分自然伽马曲线呈箱形,粒度向上变细的正旋回特征相对不明显;部分具有相对明显的钟形特征,主要是由于沉积颗粒向上变细、泥质含量增加构成正旋回沉积(图 6a,c,e)。由岩性转换形成的高频层序界面,电测曲线上尽管电阻率等曲线突变特征不明显,但是有一定的响应,特别是自然伽马曲线响应较好,且可以根据测井曲线所反映的岩性变化趋势来辅助划分(图 6b,d)。由洪泛面形成的高频层序界面之下通常发育较厚泥岩,在测井曲线上呈现出“两高两低”特点,即表现出高伽马值(GR)、高中子孔隙度(CNL)、低电阻率(LLD)和低密度(DEN)的特征(图 6)。

综合以上层序界面分析与测井识别划分,结合前人研究结果,将下石盒子组划分为 1 个三级层序(图 2),其中,盒 1 段构成了上升旋回体系域,在上述高频层序界面测井识别的基础上,进一步将其细分为 2 个四级层序和 7 个五级层序。在地震剖面和三级层序对比剖面

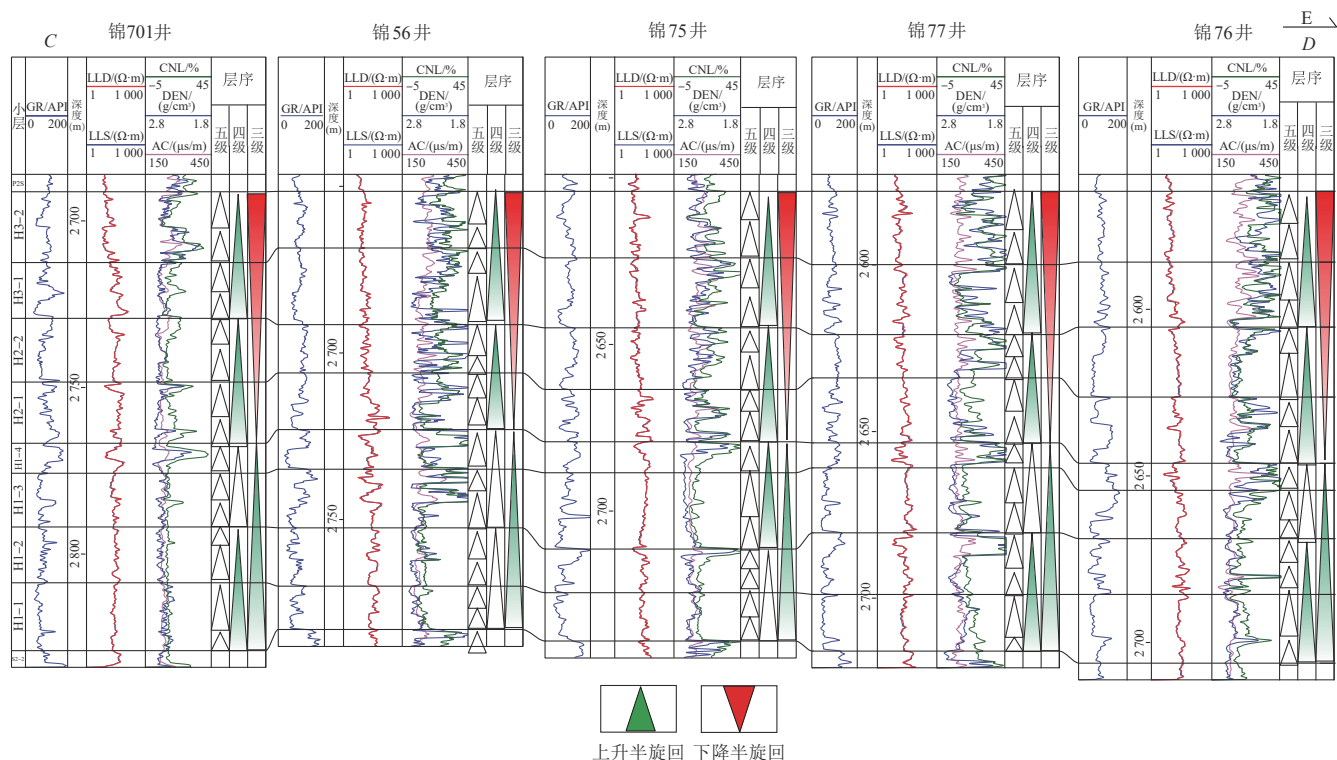


图7 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区东胜气田下石盒子组(高频)层序对比剖面(剖面位置见图1b)

Fig. 7 Cross-well correlation of (high-frequency) sequences in the Lower Shihezi Formation, Dongsheng gas field, Hangjinqi area, northern Ordos Basin (see Fig. 1b for the location of section)

的约束下,建立高频层序格架(图7)。最终依据高频层序格架划分结果和现场开发实践,将盒1段划分为4个小层,各小层横向具有一定的稳定性和对比性,其中,H1-4小层主要为泥岩沉积,其余3个小层均发育砂体,分别为H1-3,H1-2和H1-1小层(图7)。

3 沉积微相特征与展布

3.1 岩石沉积构造及沉积相标志

观察该区岩心发现,下石盒子组盒1段含砾粗砂岩、粗砂岩普遍发育,砾岩、砂砾岩、中-细砂岩等在局部发育。岩石颗粒结构组成复杂多变,分选较差,砂砾岩磨圆相对较好,为近物源牵引流沉积特征。砂砾岩通常发育于沉积旋回的底部,也可见定向排列的(细)砾岩冲刷下伏泥岩,或冲刷下伏较细粒斜层理细砂岩等。含砾粗砂岩、粗砂岩中槽状交错层理、板状交错层理等高能沉积构造发育。综合岩性和沉积构造特征,本区强水动力河道岩相非常发育(图8),例如底冲刷河道(砂)砾岩相、大型槽状交错层理(含砾)粗砂岩相、大中型板状交错层理粗砂岩相、块状层理粗砂岩相(图8a—e),其中偶夹薄层泥质粉砂岩、落於层条带泥岩沉积,

反映了辫状河心滩砂坝反复叠置。斜层理中砂岩相、平行层理中-细砂岩相、砂纹层理细砂岩相等通常发育于粒度向上变细的沉积旋回顶部(图8f,g),显然形成于河流改道或枯水期的河道砂质充填作用。盒1段中也可见有灰绿色泥岩、褐色泥岩和杂色泥岩沉积,厚度可达5~10 m,为泛滥平原泥质沉积,泥岩局部断面偶见植物炭屑化石(图8h)。

从整段岩心垂向组合来看,该区盒1段发育多期叠置的粗砂(砾)岩体的正韵律沉积,反映了浅水辫状河沉积在强水动力作用下多次冲刷叠置、迁移连片的形成过程。以锦75井为例,盒1段取心(埋深2 774.6~2 776.8 m,累计长度约为2.5 m)主要由4个厚度在0.3~1.0 m的正旋回沉积叠置而成,构成了4期向上变浅的米级河道沉积序列(图8i)。每个旋回底部通常存在较明显的河道冲刷面,纵向上由底部砂砾岩段、中下部(含砾)粗砂岩段和顶部中-细砂岩段组成,构成了(砂)砾岩、含砾粗砂岩、粗砂岩、中砂岩或细砂岩的垂向沉积序列,呈明显不对称的“二元结构”,河床亚相厚度远大于堤岸亚相,呈典型的“砂包泥”沉积结构。这种间断正韵律反映沉积时期河流水体浅,水动力强,河道宽,河道被很多心滩分割,易迁移,堤岸亚相欠发育,各期次砂体在纵向上切割叠置,垂向加积的细粒沉积物厚度小且不连



图8 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区东胜气田锦77井区下石盒子组盒1段岩相特征

Fig. 8 Pictures showing the lithofacies characteristics of the He 1 Member in the Jin-77 well block within the Dongsheng gas field,

Hangjinqi area, northern Ordos Basin

a. 锦77井,深度2 702.5 m,灰白色砂砾岩,河道滞留沉积; b. 锦77井,深度2 678.6 m,灰白色砂砾岩、砂岩,冲刷面构造,界面上为灰白色砂砾岩,石英砾、岩屑砾、泥砾,最大砾径60 mm,底部为深灰色泥岩; c. 锦76井,深度2 729.3 m,粗砂岩,冲刷面; d. 锦77井,深度2 707.5 m,含砾粗砂岩,槽状交错层理; e. 锦77井,深度2 709.4 m,粗砂岩,块状层理; f. 锦76井,深度2 726.7 m,灰白色中砂岩,夹灰色泥质条带呈斜层理; g. 锦76井,深度2 726.4 m,中-细砂岩,夹粉砂质泥岩条带,平行层理; h. 锦77井,深度2 683.5 m,灰色泥岩,断面含植物化石印痕; i. 锦77井,深度2 710.3 ~ 2 713.0 m,辫状河道非典型二元结构,下部河床沉积厚度远大于上部堤岸、河漫滩; j, k. 锦77井,深度2 698.5 ~ 2 704.4 m,辫状河沉积由砂砾岩,含砾粗砂岩和中-细砂岩组成的向上变细的米级旋回特征明显; l. 盒1段河道心滩砂体多期叠置特征,山西保德保德扒楼沟剖面 (a—k为岩心照片;l为野外剖面照片,其中黄色虚线为岩层界面。所有岩心直径均为10 cm。)

续,砂岩所占的比例明显多于泥岩,为典型辫状河沉积特征(图8j,k)。山西保德扒楼沟野外露头剖面也显示,盒1段河道心滩砂体明显具有多期叠置的特征(图8l)。

3.2 沉积微相类型及其测井响应特征

上述岩心观察的沉积相标志表明,研究区总体为

低可容纳空间、高沉积速率的游荡性辫状河沉积^[35-36]。进一步利用岩相叠置垂向组合详细标定测井曲线,分析辫状河沉积微相的测井响应特征,综合游荡性浅水辫状河沉积模式与微相类型,认为本区盒1段主要包含以下3种微相。

1) 心滩微相:通常发育于河道沉积旋回的中下

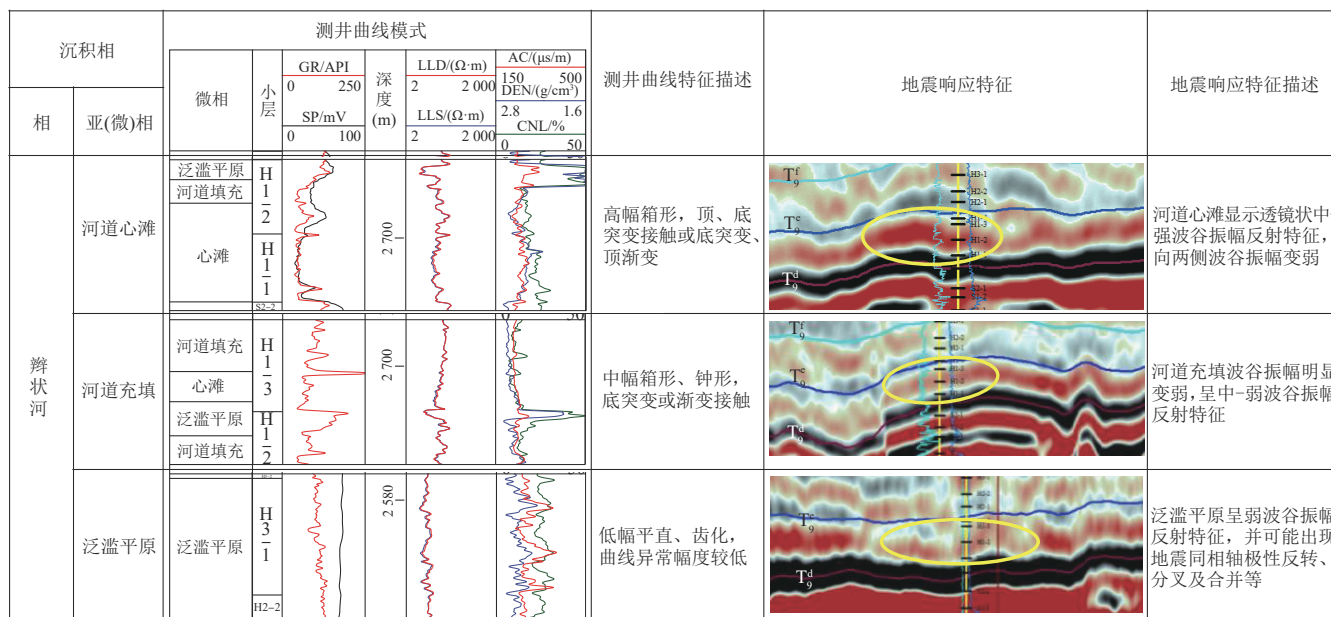


图9 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区东胜气田锦77井区盒1段沉积微相对应的测井曲线模式与地震响应特征

Fig. 9 Logging curve patterns and seismic response characteristics reflecting the sedimentary microfacies of the He 1 Member in the Jin-77 well block within the Dongsheng gas field, Hanginqi area, northern Ordos Basin

(地震剖面为变密度显示, 黄色椭圆位置为目的层盒1段, 红色为波谷, 黑色为波峰, 颜色越红, 代表波谷振幅越大, 颜色越浅, 代表波谷振幅值越低。)

部,底部多伴随着河道冲刷面发育,可见薄层(一般厚度<20 cm)河道滞留(砂)砾岩沉积,然后渐变为槽状或板状交错层理(含砾)粗砂岩相(图8a—e),部分粗砂岩岩心层理构造不明显,呈相对均匀的块状层理粗砂岩相。总体上心滩微相主体岩性为(含砾)粗砂岩,夹薄层粉砂质泥岩或泥质粉砂岩,为每次洪泛期末水动力下降而形成的一种悬浮落淤沉积。由于辫状河浅而宽,心滩主要是在多次周期性的洪水泛滥过程中,由粗粒沉积物的垂向加积或顺流加积作用而形成的,相互之间在垂向上切割叠置^[37, 38]。因而,心滩微相的自然伽马曲线主要呈高幅、中-高幅齿化箱形,底部突变主要是由冲刷面导致,顶部突变为河流突然改道后发育泛滥平原泥质沉积所致(图9)。

2) 河道砂质充填微相:通常底部也具有冲刷下蚀面,发育薄层砂砾岩滞留沉积,逐渐向上发育斜层理中-细砂岩相(图8f, g),呈粒度逐渐变细的正韵律沉积特征。显然,河道砂质充填微相是由于河流逐渐改道或枯水期水动力减弱,水流携带的泥砂在心滩两侧河道沉积下来,可见岩性逐渐变细,相应的自然伽马曲线以高-中幅齿化钟形为主(图9)。

3) 泛滥平原微相:岩性主要为泥岩(图8h),局部发育少量变形层理,断面处偶见植物碳屑等。在垂向相序的上部相对更发育,夹薄层平行层理中-细砂岩相、砂纹层理细砂岩相、波状层理粉砂岩相,对应的测井曲线幅度异常低,呈低幅平直的特征(图9)。

综合以上盒1段沉积微相类型及其对应的测井与地震响应特征,建立锦77井区盒1段主要沉积微相的测井相和地震相模式(图9),为单井、连井沉积微相分析提供依据。

3.3 H1-2小层沉积微相展布

利用测井相开展区内所有井的单井沉积微相识别与划分,然后根据单井合成地震记录详细标定(图3),用单井相来标定地震相,优选与单井沉积微相匹配最好的地震属性,开展锦77井区盒1段沉积微相连井剖面对比分析^[6]。与连井沉积微相对应的地震剖面中,可以识别出以下3种沉积微相相应的地震相反射:心滩微相主要具有强波谷振幅-短轴反射特征(图9,图10a),表现出心滩砂体与下伏泥岩形成的强波阻抗反射界面的响应特征;泛滥平原微相,呈不连续-弱波谷振幅地震相,主要为泥岩、砂-泥岩薄互层等水动力能量较低的沉积组合^[6];河道充填微相,主要为中-弱波谷中-短轴状反射地震相(图9,图10a)。根据上述沉积微相在地震剖面上的响应特征,发挥三维地震数据横向分辨率较高的特点,完成连井剖面沉积微相对比(图10)^[6]。结果显示,研究区盒1段早-中期主要为辫状河河道与心滩沉积,晚期逐渐出现泛滥平原泥质沉积,反映沉积水体能量总体向上变弱(图10b)。

研究区盒1段河道砂体展布与叠置关系复杂,心滩连续性差,平均井距5~10 km以上,针对这种井距大的

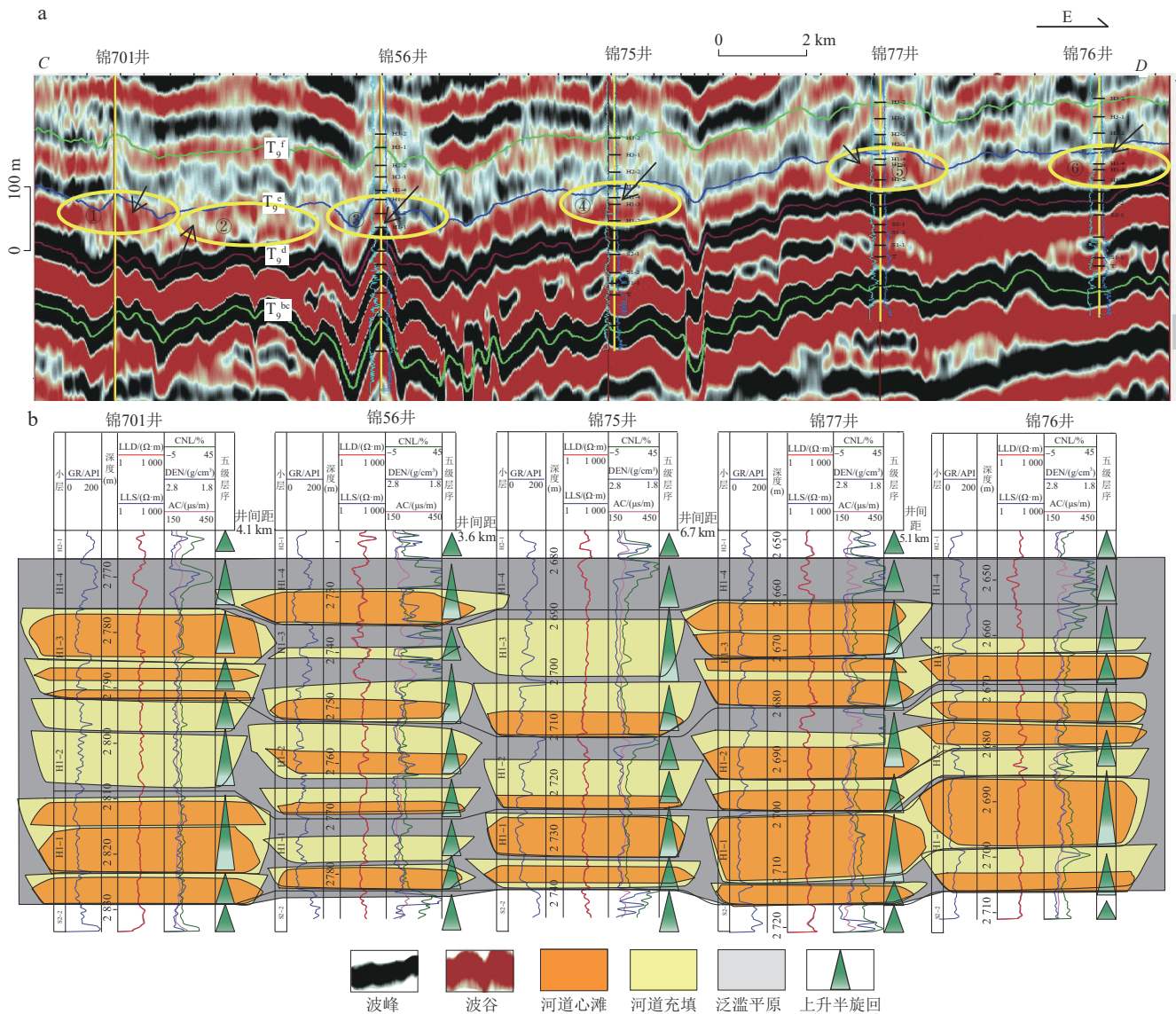


图10 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区东胜气田盒1段连井地震剖面(a)和沉积微相(b)对比(剖面位置见图1b)

Fig. 10 Correlation of cross-well seismic section (a) and sedimentary microfacies (b) for the He 1 Member in the Dongsheng gas field, Hanginqi area, northern Ordos Basin (see Fig. 1 for the location of section CD)

①中-弱波谷振幅,河道充填为主;②弱波谷振幅,伴随同相轴变化快,泛滥平原;③中-弱波谷振幅,河道充填为主;④中-弱波谷振幅,河道充填为主;⑤强波谷振幅,透镜状,心滩微相发育;⑥中-强波谷振幅,河道充填-心滩微相
(地震剖面为变密度显示,黄色椭圆位置为目的层盒1段,红色为波谷,黑色为波峰,颜色越红,代表波谷振幅越大,颜色越浅,代表波谷振幅值越低。)

研究区,仅利用井资料难以准确描述微相平面边界,有必要开展井-震联合的沉积微相平面展布分析。然而,研究区地震数据纵向分辨率较低,在纵向上难以分辨小层单元的沉积微相,尽管波阻抗地质统计学反演可以提高纵向分辨率,但受河道砂体、岩石组合类型多样的影响,砂体地震响应复杂,研究区目的层砂岩、泥岩阻抗叠置严重,波阻抗反演结果具有不确定性^[6,39-40]。值得注意的是,三维地震资料纵向和横向分辨率大致相同,但沉积地质体横向分布通常远大于纵向分布^[20,21],因此,地震垂向上难以分辨的沉积体,在横向或平面上

则有可能识别^[19-22,41]。基于上述高频层序格架与精细划分的小层,结合地球物理地层切片技术,将井点目的层段沉积特征的纵向高分辨率,与地球物理属性的横向高分辨率结合,来准确刻画地质体空间展布^[42]。

然后,利用地球物理正演,对比分析不同微相沉积组合的地震响应特征,明确不同微相的有利属性,为其平面精细描述提供地球物理基础。盒1段沉积总体以切割叠置的厚层砂岩为主,泥岩通常以夹层或隔层的形式存在,厚度相对较薄,而上覆与下伏地层砂岩相对较少,均以泥岩占优势。因此,根据目的层及上下地层

沉积结构主要为泥岩包裹厚层砂岩的特征,设计了不同砂体厚度分布于泥岩中的地质模型,开展正演分析,明确不同沉积组合及其微相的地震响应特征。不同砂泥岩层的层速度和密度参数,是影响地球物理正演模型反射特征的重要因素,锦77井区目的层埋深通常为2 500~2 800 m。根据研究区盒1段完钻井的声波时差数据的砂泥岩层速度统计,砂岩层速度低于泥岩,砂岩层速度平均值为4 250 m/s,密度为2.43 g/cm³,泥岩层速度平均值为4 475 m/s,密度为2.48 g/cm³。不同厚度河道砂体地质模型地震正演进一步证实了上述结果,即显示随着砂体厚度的增加,最大波谷振幅属性增强(图11a)。进一步基于前述井-震精细标定结果,统计了研究区及邻区目的层井旁道砂体厚度与最大波谷振幅属性的关系,可以发现砂体厚度与最大波谷振幅属性值具有一定的正相关关系(图11b),表明该结果可为确定河道砂体边界提供可靠依据。

进一步将砂体沉积细分为心滩与河道充填微相,进行正演模拟,依据声波时差曲线,统计了心滩砂岩、河道充填砂岩和泛滥平原泥岩的层速度平均值分别为4 175, 4 325和4 475 m/s,而密度的平均值分别为2.41, 2.45和2.48 g/cm³。地球物理正演结果显示,心滩、河道砂质充填、泛滥平原这三种沉积微相对应的最大波谷振幅属性值明显依次降低,说明该属性在一定程度上可反映沉积微相特征(图12a)。在此基础上,统计、绘制了盒1段不同微相井旁道最大波谷振幅属性值与不同沉积微相的关系分布图(图12b),确定相应沉积微相的振幅值区间。结果显示,最大波谷振幅大于200 μm 时,主要发育心滩微相,岩性以含砾粗砂岩为主;最大波谷振幅在1 250~2 500 μm 时,河道充填微相的中-

细砂岩发育;最大波谷振幅小于1 250 μm 时,主要为泛滥平原泥岩沉积(图12b)。由此可见,不仅可以利用最大波谷振幅属性与砂体厚度变化的相关关系来反映砂岩、泥岩相对含量,实现河道形态及其边界的精细描述,还可以按照最大波谷振幅不同的门槛值,完成心滩、河道充填等沉积微相的边界精细描述^[6, 43-45]。因此针对少井区,本次研究提取目的小层最大波谷振幅属性作为约束,开展沉积微相平面展布精细刻画。

优选有明确地质年代界面意义的参照同相轴是充分发挥地层切片技术的关键^[46]。地震波组T₆^s、T₆^d为盒1段的顶、底界面,特别是底界面T₆^d的地震反射特征稳定,地质年代意义明确,为区域标准反射层,明显具有相对等时面的性质^[20, 46]。研究区地层发育也相对稳定,以基于高频层序格架的层位精细解释为基础,通过目的小层地层切片属性提取,结合研究区沉积环境特征及测井解释结果,能够有效地反映该层段沉积微相^[41]。该方法在追踪等时地质界面的同时,还可以较好地反映常见沉积体系的地貌特征^[20]。

综上,基于高频层序格架及小层精细对比约束,在井点层位与地震层位之间一致性分析的基础上,通过对原始地震数据进行90°相位转换,使波谷振幅属性与低自然伽马(GR)测井曲线对应性更好,即地震波谷振幅属性剖面与岩性剖面一致(图13)。以T₆^d和T₆^e作为地层切片的标准层或相对等时面,利用地层切片属性提取技术,提取目的层H1-2小层的最大波谷振幅,使属性提取的地质意义更加明确并具有针对性(图14)。进一步以H1-2小层最大波谷振幅属性平面分布来约束沉积微相展布(图14c),并根据最大波谷振幅属性的连续性特征,采取单井定点-连井定剖-属性定面的多维交互研究方法,精细描述了研究区H1-2小层沉积

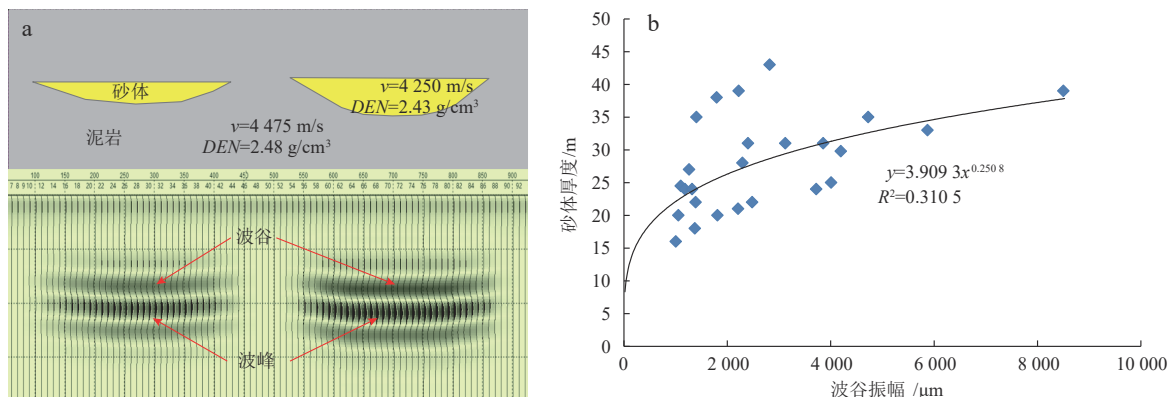


图11 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区东胜气田盒1段不同厚度砂体地质模型正演(a)及砂体厚度与最大波谷振幅关系(b)

Fig. 11 Forward modeling results of the geological model of varying sand-body thicknesses (a) and the relationship between sand body thickness and the maximum trough amplitude (b) for the He 1 Member in the Dongsheng gas field, Hangjinqi area, northern Ordos Basin (v表示速度;DEN表示密度。)

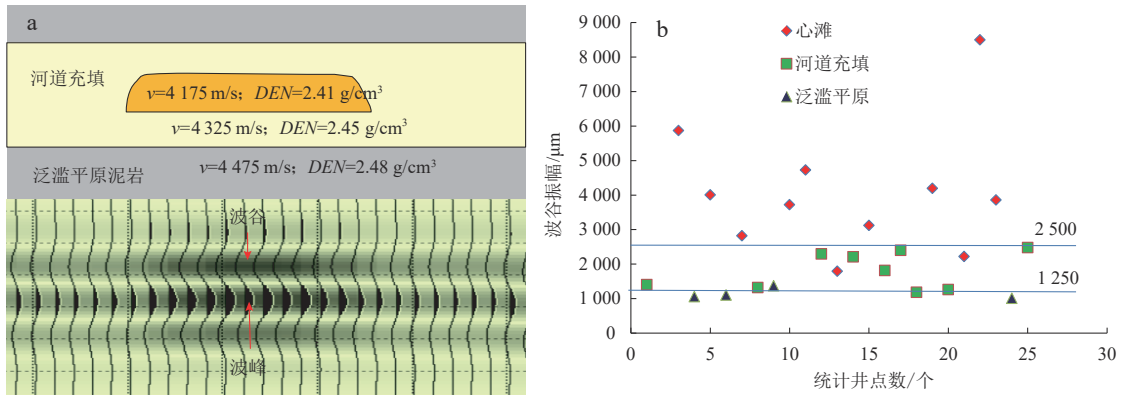


图12 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区东胜气田盒1段不同沉积微相地质模型正演(a)及其与最大波谷振幅关系(b)

Fig. 12 Forward modeling results of the geological model of varying sedimentary microfacies (a) and the relationship between sedimentary microfacies and the maximum trough amplitude (b) for the He 1 Member in the Dongsheng gas field, Hangjinqi area, northern Ordos Basin (v 表示速度; DEN 表示密度。)

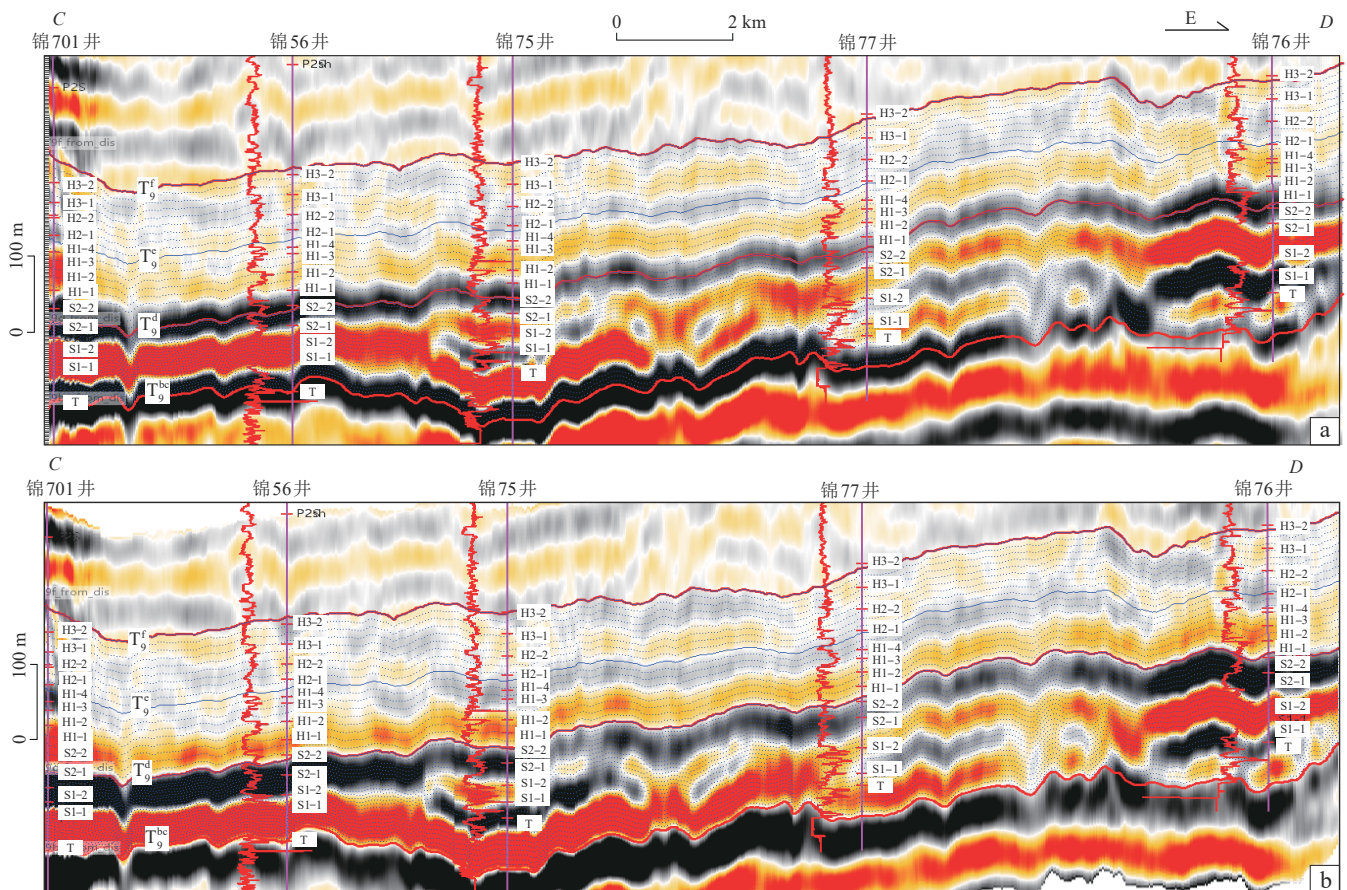


图13 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区东胜气田过锦701井—锦76井0°相位地震剖面(a)与90°相位转换地震剖面(b)特征对比及地层切片设置(剖面位置见图1b)

Fig. 13 Characteristic comparison between and stratal slicing setting for zero-phase (a) and converted 90°-phase (b) seismic sections crossing wells from Jin-701 to Jin 76 in the Dongsheng gas field, Hangjinqi area, northern Ordos Basin (see Fig. 1 for the location of section C—D)

微相的平面分布^[6]。从平面微相展布结果上看(图14a),H1-2小层发育近南北向展布的3~4条辫状河道,宽度主要介于1~8 km,西部和北部河道是心滩微相发育的有利部位。H1-1,H1-2和H1-3小层切片所

反映的沉积演化特征表明,H1-1—H1-2小层沉积时期,辫状河道具有明显侧向迁移的特征,H1-1小层辫状河道砂体在研究区西侧更发育,H1-2小层沉积时期则具有向东迁移的特征,至H1-3小层沉积时期,主要的辫状河道

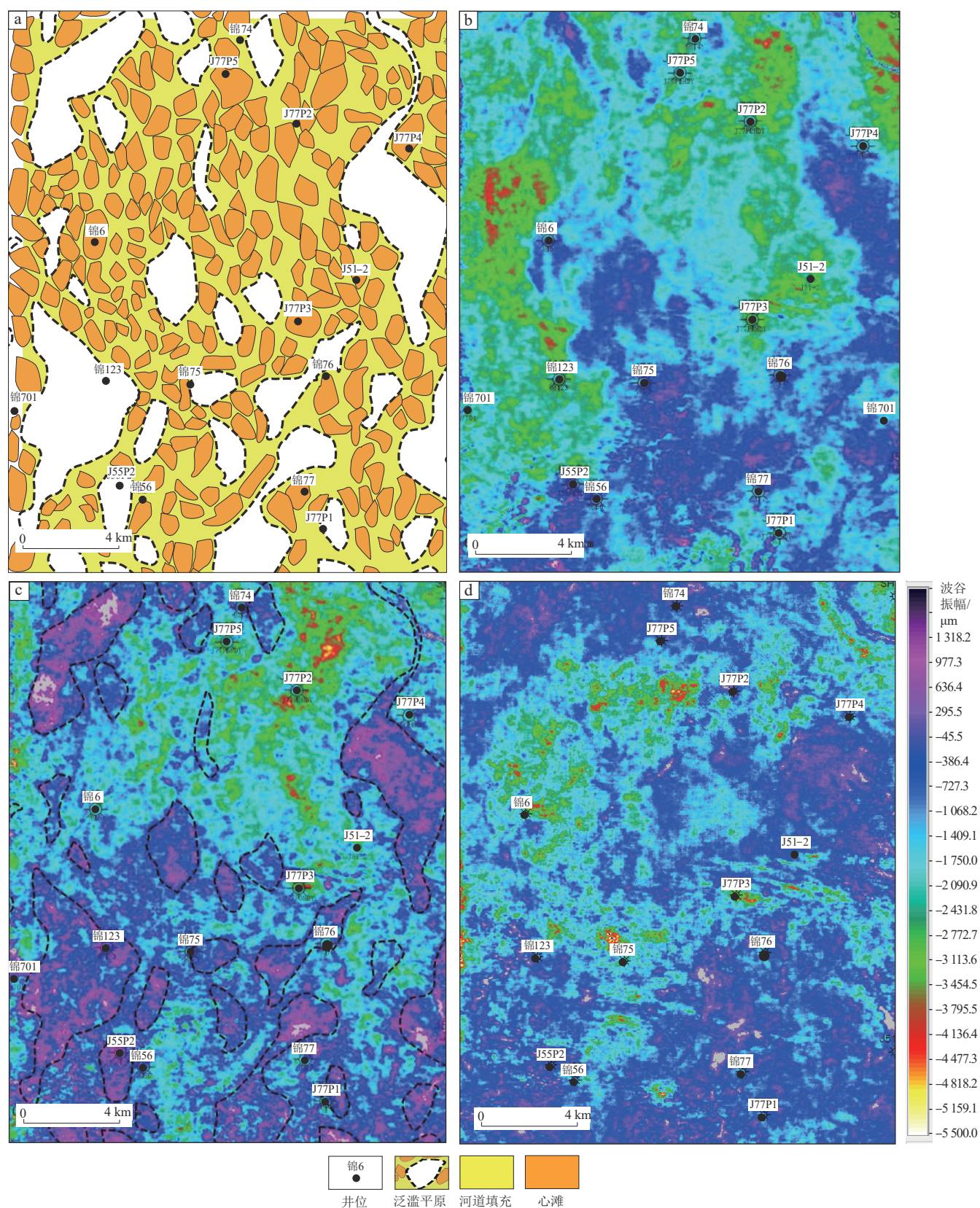


图 14 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗地区东胜气田 H1-2 小层沉积微相(a)与 H1-1—H1-3 小层地震属性(b—d)平面分布

Fig. 14 Planar distributions of the seismic attributes (a) and sedimentary microfacies (b) of the H1-2 sublayer and the attributes of H1-1 (c) and H1-3 (d) sublayers in the Dongsheng gas field, Hangjinqi area, northern Ordos Basin
(b, c 和 d 分别为 T_0^d 之上第 3、第 5 和第 7 张切片, 大致与 H1-1, H1-2 和 H1-3 小层对应。)

又摆动到工区中西部,这与前述沉积分析的辫状河河道不固定、易迁移的特征一致(图8i—k)。利用H1-2小层GR曲线所反映的沉积微相来标定地震属性和沉积微相平面展布,结果显示井-震一致性的吻合率高(可达85%以上),表明基于井-震联合地层切片技术的沉积微相研究,是小层级辫状河道刻画的可方法之一。

4 结论

1) 鄂尔多斯盆地北部杭锦旗东胜气田锦77地区盒1段由三级层序的上升旋回体系域构成,依据四级、五级高频层序分布可进一步划分为4个小层,主要砂层分布在H1-1—H1-3小层,每个小层厚15~20 m。基于(高频)层序界面岩心-测井一致性标定,利用测井曲线变化响应特征详细开展全井段(高频)层序界面识别,井-震联合、逐级约束,充分发挥地震数据横向连续性好的优点,是解决辫状河多期河道切割叠置地层层序与小层对比的有效方法。

2) 综合盒1段岩性、沉积构造、沉积相标志、垂向组合、砂体纵向和平面分布等分析,认为目的层主要为低可容纳空间、物源供给充分、河道不固定的游荡性辫状河沉积。心滩、河道砂质充填和泛滥平原是最主要的3种沉积微相,主要目的层H1-2小层发育近南北向条带状展布的辫状河道3~4条,宽度主要介于1~8 km,北部河道是心滩微相发育的有利部位。

3) 采用岩心相标定测井相,利用测井相来识别和划分目的层段沉积微相,然后利用单井相标定地震相,结合地球物理正演,优选敏感地震属性,开展沉积微相纵、横向展布研究。利用地震资料横向分辨率相对较高的优势,基于高频层序格架约束和相对等时面,提取目的小层地层切片的地震属性,通过单井定点-连井定剖-属性定面的多维交互研究方法,实现地质-地球物理一体化综合标定与分析,可有效分析小层沉积微相平面展布。

参 考 文 献

- [1] 郝蜀民, 李良, 张威, 等. 鄂尔多斯盆地北缘石炭系-二叠系大型气田形成条件[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 149-154.
HAO Shumin, LI Liang, ZHANG Wei, et al. Forming conditions of large-scale gas fields in Permo-Carboniferous in the northern Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 149-154.
- [2] 何发岐, 王付斌, 张威, 等. 鄂尔多斯盆地北缘勘探思路转变与天然气领域重大突破[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(6): 39-49.
HE Faqi, WANG Fubin, ZHANG Wei, et al. Transformation of exploration ideas and major breakthrough in natural gas discovery in the northern margin of the Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(6): 39-49.

- [3] 齐荣, 李良, 秦雪霏. 鄂尔多斯盆地北缘近源砂砾质辫状河砂体构型与含气性[J]. 石油实验地质, 2019, 41(5): 682-690.
QI Rong, LI Liang, QIN Xuefei. Sand body configuration and gas-bearing properties of near source sand-gravel braided river on the northern margin of Ordos Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2019, 41(5): 682-690.
- [4] 张威, 何发岐, 闫相宾, 等. 大型辫状河席状复合河道岩性圈闭识别描述方法及应用[J]. 石油实验地质, 2021, 43(3): 432-442.
ZHANG Wei, HE Faqi, YAN Xiangbin, et al. Study and application of identification and description methods for lithologic traps in large braided river sheet composite channels[J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(3): 432-442.
- [5] 郭旭升, 周德华, 赵培荣, 等. 鄂尔多斯盆地石炭系-二叠系煤系非常规天然气勘探开发进展与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1013-1023.
GUO Xusheng, ZHOU Dehua, ZHAO Peirong, et al. Progresses and directions of unconventional natural gas exploration and development in the Carboniferous-Permian coal measure strata, Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1013-1023.
- [6] 李宏涛, 马立元, 史云清, 等. 基于井-震结合的水下分河流河道砂岩储层展布分析与评价——以什邡气藏JP35砂组为例[J]. 岩性油气藏, 2020, 32(2): 78-89.
LI Hongtao, MA Liyuan, SHI Yunqing, et al. Distribution and evaluation of underwater distributary channel sandstone reservoir based on well-seismic combination: A case study of JP35 sand group in Shifang gas reservoir[J]. Lithologic Reservoirs, 2020, 32(2): 78-89.
- [7] 李捷, 赵俊兴, 孔祥超, 等. 鄂北杭锦旗地区下石盒子组沉积相演化及控制因素[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2013, 32(2): 34-42.
LI Jie, ZHAO Junxing, KONG Xiangchao, et al. Sedimentary facies evolution and controlling factors of Lower Shihezi Formation in Hangjinqi area, north Ordos Basin[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science), 2013, 32(2): 34-42.
- [8] 周家林. 东胜气田锦58井区盒1段岩相特征及沉积模式研究[J]. 石油地质与工程, 2018, 32(4): 1-5.
ZHOU Jialin. Lithofacies characteristics and sedimentary models for He1 member in Jin 58 well block of Dongsheng gas field[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2018, 32(4): 1-5.
- [9] 曹桐生. 杭锦旗地区锦72井区盒1段沉积特征[J]. 天然气技术与经济, 2019, 13(4): 8-16.
CAO Tongsheng. Depositional characteristics of Shihezi 1 Member, Jin 72 well block of Hangjinqi area, Ordos Basin[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2019, 13(4): 8-16.
- [10] 刘钰铭, 陈儒贤, 赵丁丁, 等. 东胜气田锦72井区下石盒子组砾质辫状河沉积特征[J]. 石油科学通报, 2022, 7(4): 457-474.
LIU Yuming, CHEN Ruxian, ZHAO Dingding, et al. Sedimentary characteristics of gravelly braided rivers of the Lower Shihezi Formation in the Jin 72 well area, Dongsheng Gas Field[J]. Petroleum Science Bulletin, 2022, 7(4): 457-474.
- [11] 韩兴刚, 肖峰, 张伟, 等. 辫状河沉积储层小层精细划分对比——以苏里格气田苏X加密井区为例[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(1): 76-84.

- HAN Xinggang, XIAO Feng, ZHANG Wei, et al. Stratigraphic division and correlation of braid river reservoir—An example from Su X dense well area, Sulige Gas Filed[J]. Periodical of Ocean University of China, 2018, 48(1): 76–84.
- [12] 刘晓晨, 陆永潮, 杜学斌, 等. 层序格架约束下的地质统计学反演在薄砂体预测中的应用[J]. 地质科技通报, 2020, 39(3): 99–109.
- LIU Xiaochen, LU Yongchao, DU Xuebin, et al. Application of geostatistical inversion constrained by sequence framework in thin-bedded sandbody prediction [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(3): 99–109.
- [13] NUNES R, SOARES A, AZEVEDO L, et al. Geostatistical seismic inversion with direct sequential simulation and co-simulation with multi-local distribution functions [J]. Mathematical Geosciences, 2017, 49(5): 583–601.
- [14] VAIL P R, TODD R G, SANGREE J B. Seismic stratigraphy and global changes of sea level, part 5: Chronostratigraphic significance of seismic reflections [M]//PAYTON C E. Seismic Stratigraphy—Applications to Hydrocarbon Exploration. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 1977: 99–116.
- [15] MITCHUM R M, Jr, VAN WAGONER J C. High-frequency sequences and their stacking patterns: Sequence-stratigraphic evidence of high-frequency eustatic cycles [J]. Sedimentary Geology, 1991, 70(2/4): 131–160.
- [16] 游李伟, 彭军, 汪彦, 等. 高频层序研究在碳酸盐岩储层对比中的应用——以塔河油田 TK625 井区鹰山组上部储层为例[J]. 新疆地质, 2006, 24(1): 59–63.
- YOU Liwei, PENG Jun, WANG Yan, et al. Application of high-frequency sequence study in the correlation of carbonate reservoirs—Illustration in Upper Yingshan Formation around TK625 Well in Tahe Oil Field[J]. Xinjiang Geology, 2006, 24(1): 59–63.
- [17] 梅冥相, 徐德斌, 周洪瑞. 米级旋回层序的成因类型及其相序组构特征[J]. 沉积学报, 2000, 18(1): 43–49, 62.
- MEI Mingxiang, XU Debin, ZHOU Hongrui. Genetic types of meter-scale cyclic sequences and their fabric features of facies-succession [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2000, 18(1): 43–49, 62.
- [18] 李宏涛, 史云清, 肖开华, 等. 元坝气田须三段气藏层序沉积与储层特征[J]. 天然气工业, 2016, 36(9): 20–34.
- LI Hongtao, SHI Yunqing, XIAO Kaihua, et al. Sequence, sedimentary and reservoir characteristics of Xu 3 gas reservoir in the Yuanba Gasfield, NE Sichuan Basin [J]. Natural Gas Industry, 2016, 36(9): 20–34.
- [19] 曾洪流, 朱筱敏, 朱如凯, 等. 陆相拗陷型盆地地震沉积学研究规范[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 275–284.
- ZENG Hongliu, ZHU Xiaomin, ZHU Rukai, et al. Guidelines for seismic sedimentologic study in non-marine postrift basins [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 275–284.
- [20] 朱筱敏, 董艳蕾, 曾洪流, 等. 沉积地质学发展新航程——地震沉积学[J]. 古地理学报, 2019, 21(2): 189–201.
- ZHU Xiaomin, DONG Yanlei, ZENG Hongliu, et al. New development trend of sedimentary geology: Seismic sedimentology [J]. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 2019, 21(2): 189–201.
- [21] GALLOWAY W E, HOBDAI D K. Terrigenous clastic depositional systems: Applications to petroleum, coal, and uranium exploration [M]. New York: Springer-Verlag, 1983: 1–423.
- [22] 岳大力, 李伟, 杜玉山, 等. 河流相储层地震属性优选与融合方法综述[J]. 地球科学, 2022, 47(11): 3929–3943.
- YUE Dali, LI Wei, DU Yushan, et al. Review on optimization and fusion of seismic attributes for fluvial reservoir characterization [J]. Earth Science, 2022, 47(11): 3929–3943.
- [23] 印森林, 章彤, 唐文军, 等. 井震结合表征曲流型河道储层叠置样式: 以准噶尔盆地东部阜东 5 井区侏罗系头屯河组为例[J]. 地球科学, 2022, 47(11): 4060–4074.
- YIN Senlin, ZHANG Tong, TANG Wenjun, et al. Reservoir superposed pattern characterization of well-logging and seismic data calibration with meandering channels: A case study of Jurassic Toutunhe Formation in Fudong No. 5 Well area, eastern Junggar Basin[J]. Earth Science, 2022, 47(11): 4060–4074.
- [24] 黄文松. 三维地震约束辫状河储层的多点统计建模研究: 以委内瑞拉 M 区块为例[J]. 地球科学, 2022, 47(11): 4033–4045.
- HUANG Wensong. Multiple-point geostatistical modeling of braided channel reservoir with constraints by 3D seismic data: A case study of M Block in Venezuela[J]. Earth Science, 2022, 47(11): 4033–4045.
- [25] 刘震, 王大伟, 吴辉, 等. 利用地震资料进行陆相储层小层等时对比的方法研究——以绥中 36-1 油田为例[J]. 地学前缘, 2008, 15(1): 133–139.
- LIU Zhen, WANG Dawei, WU Hui, et al. Research on isochronic subzone correlation of non-marine reservoir by seismic data: A case study in SZ36-1 oil-field, Bohai Bay Basin [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(1): 133–139.
- [26] 罗开平, 杨帆, 陆永德, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗地区关键构造期与二叠系致密气成藏响应[J]. 石油实验地质, 2021, 43(4): 557–568.
- LUO Kaiping, YANG Fan, LU Yongde, et al. Key structural periods and Permian tight gas accumulation response in Hangjinqi area, Ordos Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2021, 43(4): 557–568.
- [27] 曹桐生, 罗龙, 谭先锋, 等. 致密砂岩储层成因及其孔隙演化过程——以杭锦旗十里加汗地区下石盒子组为例[J]. 断块油气田, 2021, 28(5): 598–603.
- CAO Tongsheng, LUO Long, TAN Xianfeng, et al. Genesis and pore evolution of tight sandstone reservoir: Taking Lower Shihezi Formation in the Shilijiahan Block of Hangjinqi area as an example [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2021, 28(5): 598–603.
- [28] 郭顺, 闫继福, 郭兰, 等. 鄂北杭锦旗地区太原组沉积微相分析[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2009, 39(2): 283–287.
- GUO Shun, YAN Jifu, GUO Lan, et al. The sedimentary microfacies of Taiyuan formation in the Hangjinqi area, the North of Ordos Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2009, 39(2): 283–287.
- [29] 赵明胜, 田景春, 张翔, 等. 储层特征及其主控因素分析——以鄂北十里加汗地区下二叠统山西组为例[J]. 断块油气田, 2020, 27(2): 155–159.
- ZHAO Mingsheng, TIAN Jingchun, ZHANG Xiang, et al. Reservoir characteristics and main controlling factor analysis: Taking Lower Permian Shanxi Formation in Shilijiahan area of north Ordos Basin as an example [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(2): 155–159.
- [30] 陈安清, 陈洪德, 徐胜林, 等. 鄂尔多斯盆地北部晚古生代沉积充填与兴蒙造山带“软碰撞”的耦合[J]. 吉林大学学报(地球

- 科学版), 2011, 41(4): 953-965.
- CHEN Anqing, CHEN Hongde, XU Shenglin, et al. Sedimentary filling of north Ordos and their implications for the soft collision process of Hing Gan Mts. -Mongolia orogenic belt in Late Paleozoic[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2011, 41(4): 953-965.
- [31] 李智, 叶加仁, 曹强, 等. 鄂尔多斯盆地杭锦旗独贵加汗区带下石盒子组储层特征及孔隙演化[J]. 地质科技通报, 2021, 40(4): 49-60.
- LI Zhi, YE Jiaren, CAO Qiang, et al. Reservoir characteristics and pore evolution of the Lower Shihezi Formation in Duguijiahan zone, Hangjinqi area, Ordos Basin [J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2021, 40(4): 49-60.
- [32] 石巨业, 金之钧, 刘全有, 等. 基于米兰科维奇理论的湖相细粒沉积岩高频层序定量划分[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(6): 1205-1214.
- SHI Juye, JIN Zhijun, LIU Quanyou, et al. Quantitative classification of high-frequency sequences in fine-grained lacustrine sedimentary rocks based on Milankovitch theory[J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(6): 1205-1214.
- [33] 梁岳立, 赵晓明, 张喜, 等. 轨道周期约束下海-陆过渡相页岩层系高精度层序界面识别及其地质意义——以鄂尔多斯盆地东缘二叠系山西组2³亚段为例[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(5): 1231-1242.
- LIANG Yueli, ZHAO Xiaoming, ZHANG Xi, et al. Orbital forced high-resolution sequence boundary identification of marine-continental transitional shale and its geological significance: A case in Shan 2³ sub-member at the eastern margin of Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(5): 1231-1242.
- [34] 刘成龙, 王艳忠, 杨怀宇, 等. 高精度层序约束下三角洲-滩坝沉积体系精细刻画与岩性圈闭分布规律——以渤海湾盆地济阳坳陷东营凹陷南坡东段沙河街组四段上亚段为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 1121-1141.
- LIU Chenglong, WANG Yanzhong, YANG Huaiyu, et al. Fine characterization and lithologic trap distribution patterns of delta-beach bar sedimentary system under high-precision sequence constraints: A case study of the upper submember of the 4th member of the Shahejie Formation in the eastern segment of the southern gentle slope of Dongying Sag, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 1121-1141.
- [35] 王敏, 穆龙新, 赵国良, 等. 分汊与游荡型辫状河储层构型研究: 以苏丹FN油田为例[J]. 地学前缘, 2017, 24(2): 246-256.
- WANG Min, MU Longxin, ZHAO Guoliang, et al. Architecture analysis of reservoirs in branching-and wandering-based braided rivers: Taking FN field, Sudan as an example[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(2): 246-256.
- [36] EATON B C, MILLAR R G, DAVIDSON S. Channel patterns: Braided, anabranching, and single-thread [J]. Geomorphology, 2010, 120(3/4): 353-364.
- [37] 于兴河, 马兴祥, 穆龙新, 等. 辫状河储层地质模式及层次界面分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004.
- YU Xinghe, MA Xingxiang, MU Longxin, et al. Geology model and hierarchy interlace analysis of braid river [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004.
- [38] 雷涛, 任广磊, 李晓慧, 等. 砂质辫状河心滩沉积演化规律与沉积构型特征——基于沉积数值模拟的认识[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1595-1608.
- LEI Tao, REN Guanglei, LI Xiaohui, et al. Sedimentary evolution pattern and architectural characteristics of mid-channel bars in sandy braided rivers: Understanding based on sedimentary numerical simulation [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1595-1608.
- [39] 夏世强, 刘景彦, 邓纪梅, 等. 井间河道砂体的井震结合精细解剖刻画[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2013, 35(4): 59-68.
- XIA Shiqiang, LIU Jingyan, DENG Jimei, et al. River channel sand body prediction by integrating well log and seismic attributes analysis in dense well pattern [J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition), 2013, 35(4): 59-68.
- [40] 惠晓宇, 凌云, 孙德胜, 等. 油田开发阶段叠后地震反演影响因素研究[J]. 中国海上油气, 2009, 21(5): 308-312.
- HUI Xiaoyu, LING Yun, SUN Desheng, et al. A research on the factors to influence post-stack seismic inversion during oilfield production[J]. China Offshore Oil and Gas, 2009, 21(5): 308-312.
- [41] 李操, 姜岩, 樊晓东, 等. 大庆长垣油田开发地震沉积学研究[J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(4): 916-925.
- LI Cao, JIANG Yan, FAN Xiaodong, et al. Seismic sedimentology for development of Daqing Changyuan Oilfield [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(4): 916-925.
- [42] 谢玉洪. 基于地震构形的相控储层预测方法[J]. 石油物探, 2021, 60(5): 784-793.
- XIE Yuhong. Facies-controlled reservoir prediction based on the seismic configuration [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2021, 60(5): 784-793.
- [43] ZENG Hongliu, AMBROSE W A, VILLALTA E. Seismic sedimentology and regional depositional systems in Miocene Norte, Lake Maracaibo, Venezuela [J]. The Leading Edge, 2001, 20(11): 1260-1269.
- [44] 韩喜, 高兴友, 车廷信, 等. 利用地震属性沿层分析方法研究河流相沉积环境[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(1): 120-124.
- HAN Xi, GAO Xingyou, CHE Tingxin, et al. Using analysis of seismic attributes along horizons to study sedimentary environment of fluvial facies[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(1): 120-124.
- [45] 陈波, 段冬平, 刘英辉, 等. 西湖凹陷中深层河流相砂体地震沉积学解释与沉积演化分析[J]. 中国海上油气, 2019, 31(3): 117-126.
- CHEN Bo, DUAN Dongping, LIU Yinghui, et al. Seismic sedimentary interpretation and sedimentary evolution analysis on middle-deep fluvial facies sandbodies in Xihu sag, East China Sea Basin [J]. China Offshore Oil and Gas, 2019, 31(3): 117-126.
- [46] 归平军, 范玲玲, 李灿. 相对等时面在东胜气田盒2+3段河道识别中的应用[J]. 石油地质与工程, 2020, 34(4): 24-30.
- GUI Pingjun, FAN Lingling, LI Can. Application of relative isochronous surface in channel identification of He2+3 members in Dongsheng gas field [J]. Petroleum Geology and Engineering, 2020, 34(4): 24-30.

(编辑 孙川翔)