

基于分频 RGB 融合技术和水平井信息的辫状河储层构型研究

—以 C 油田馆陶组为例

侯东梅, 郭敬民*, 全洪慧, 张墨, 张文童

中海石油(中国)有限公司天津分公司, 天津 300452

* 通信作者, 303467342@qq.com

收稿日期: 2021-10-08

中海油重大科技专项“渤海馆陶组低阻油层定量评价及高效开发技术”(CNOOC-KJ135ZDXM36TJ01TJ-GD202002)和中海石油(中国)有限公司“渤海双高油田挖潜关键技术研究”(YXKY-2018-TJ-04)资助

摘要 渤海海域 C 油田馆陶组 III 油组油藏为厚层块状辫状河沉积, 油田采用天然能量驱的水平井开发, 基于不同级次储层构型单元精细表征所揭示的单一成因砂体及其渗流屏障空间分布是提高油田开发效果的关键。基于油田稀井网的数据条件, 论文采用三维地震资料分频 RGB 融合技术, 开展不同级次辫状河储层构型单元和边界的地震响应分析, 在水平井储层构型单元精细解释的标定下, 实现了 C 油田馆陶组 III 油组辫状河储层构型单元的剖面结构和平面分布的精细刻画。C 油田馆陶组主要发育心滩和辫状河道两种类型四级构型单元, 试验表明, 优选 30 Hz、45 Hz 和 65 Hz 分频体进行 RGB 融合, 能够有效揭示不同构型单元的厚度平面变化并准确探测构型单元的岩性和物性边界。分频 RGB 融合效果显示心滩主要呈亮红色, 辫状河道主要表现为淡绿色和蓝色, 在剖面上二者多为心滩-辫状河道-心滩侧向拼接关系, 平面上辫状河道环绕心滩分布。油藏的四级储层构型单元以心滩为主, 物性好, 平面上呈 NEE-SWW 向分布, 单一心滩宽 1500~2000 m, 长 2000~3500 m。辫状河道岩性变化较大, 储层物性相对较差, 四级构型单元宽 100~300 m, 平面上呈窄条带状将心滩分割, 成为不同心滩之间的渗流屏障。基于分频 RGB 融合和水平井信息的辫状河储层构型单元刻画, 提高了提取地质体和探测边界的能力, 系统地将岩性-厚度-构型的关系耦合起来, 实现了 C 油田稀井网条件下辫状河储层构型的精细刻画, 为油田综合调整方案的制定、提高油田开发效果提供了直接的地质依据。

关键词 分频 RGB 融合; 水平井; 储层构型; 辫状河; 馆陶组

Research into braided river reservoir architecture based on frequency-fused seismic attribute and horizontal wells — A case study of the Guantao Formation of C oilfield

HOU Dongmei, GUO Jingmin, QUAN Honghui, ZHANG Mo, ZHANG Wentong

引用格式: 侯东梅, 郭敬民, 全洪慧, 张墨, 张文童. 基于分频 RGB 融合技术和水平井信息的辫状河储层构型研究—以 C 油田馆陶组为例. 石油科学通报, 2022, 01: 1-11

HOU Dongmei, GUO Jingmin, QUAN Honghui, ZHANG Mo, ZHANG Wentong. Research into braided river reservoir architecture based on frequency-fused seismic attribute and horizontal wells — A case study of the Guantao Formation of C oilfield. Petroleum Science Bulletin, 2022, 01: 1-11. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.01.001

CNOOC China Limited, Tianjin Branch, Tianjin 300452, China

Abstract The oil reservoir of the Neogene Guantao Formation III oil group (N_{1gIII}) in the C oilfield in the Bohai Sea area is a thick massive braided river deposit. The oilfield is developed by horizontal wells driven by natural energy. The spatial distribution of a single genetic sand body and its seepage barrier revealed by the fine characterization of reservoir architecture units of different levels is the key to improve the oilfield development. Based on the data conditions of sparse well patterns in the oilfield, the seismic response analysis of braided river reservoir architecture units and boundaries of different levels is carried out by using 3D seismic frequency division RGB fusion technology. Under the calibration of fine interpretation of horizontal wells, the fine characterization of braided river reservoir architecture units of N_{1gIII} in oilfield C is realized. The research reveals that the N_{1gIII} of oilfield C mainly develops two types of level 4 architecture units: braided bar and braided channel. The optimized 30 Hz, 45 Hz and 65 Hz frequency dividers for frequency-fused can effectively reveal the thickness variation and boundary response of different architecture units. In the frequency-fused seismic attribute, the braided bar is mainly bright red, the braided channel is represented by relatively dim green and blue strips, the sand body is represented by the splicing style of braided bar-braided channel- braided bar laterally, and the braided channel surrounds the braided bar in a “narrow strip” on the plane. Braided bar is the main type of level 4 reservoir architecture unit, mainly medium coarse sandstone with good physical properties. It is distributed in an NEE-SWW direction on the plane. The width and length of a single level 4 braided bar architecture unit is 1500~2000 m and 2000~3500 m respectively. The braided channel lithology changes greatly and the reservoir physical properties are poorer. The level 4 reservoir architecture unit is 100~300 m wide. It is a narrow strip on the plane to divide the braided bars and become a seepage barrier between different braided bars. The characterization of braided river reservoir architecture units based on frequency-fused seismic attribute overcomes the shortcomings of insufficient sedimentary feature information displayed by a single frequency band and single color, and improves the ability to extract geological bodies and detect boundaries. It has certain advantages for the prediction of out of limit reservoirs, and systematically couples the relationship between lithology, thickness and architecture. The combination of frequency-fused seismic attribute and horizontal well information is an effective means to realize the fine characterization of braided river reservoir architecture of offshore sparse well patterns, and provides a direct geological basis for the optimization of comprehensive oilfield adjustment schemes.

Keywords frequency-fused seismic attribute; horizontal well; reservoir architecture; braided river; Guantao Formation

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2022.01.001

0 引言

C油田是海上开发的亿吨级油田群中主力油田之一,目前整体进入特高含水阶段,水淹现象较为普遍,由于辫状河储层砂体结构复杂,横向变化快,油田的稳产、上产迫切需要开展对储层的构型精细表征^[1],以确定地下不同级次储层单元的形态、规模及叠置关系^[2]。在海上油田水平井开发模式下,水平井横向信息丰富的优势有助于确定小规模构型单元和构型界面^[3],但是由于研究区井距较大(>300 m)且水平段长度有限(300~500 m),对不同级次储层构型单元的规模及空间展布的确定依然存在较大挑战。三维地震分频RGB融合作为近十多年来地震沉积学理论的长足发展之一^[4-5],地震分频技术能够有效识别储集层时间厚度的变化,应用不同频带的地震体分辨不同厚度储层,确定储集体边界^[6],RGB融合技术可以清晰刻画其内部细微结构,具有特征明显、细节丰富和高信息量的特点^[7-8],在井控程度不高的稀井网复杂相带构型解剖中具有无可比拟的优势。前人采用该项技术多是预测“泥包砂”型的曲流河沉积砂体和分流河道型三角洲砂

体,本次研究聚焦于富砂型的辫状河沉积,综合利用岩心、测井、地震等资料,基于分频RGB融合技术发展地下储层构型解剖,结合水平井信息,验证和标定分频RGB融合结果,同时约束落淤层等小尺度的沉积类型,丰富了构型单元的研究尺度,较大程度地降低了储层构型单元井间对比预测与定量表征的不确定性,该项技术在C油田综合调整阶段得到有效应用,降低了辫状河油藏调整井的部署风险,同时对地震资料丰富的海上稀井网条件下油田储层构型单元空间展布研究具有一定的借鉴意义。

1 研究区概况

C油田位于渤海湾盆地埕宁隆起区沙垒田凸起东部的中部(图1a,1b),是在古元古界混合花岗岩基底隆起背景上发育的低幅度披覆断裂背斜^[9]。钻井揭示沙垒田凸起披覆沉积了新近系和古近系,该凸起在古近系晚期结束了自古生代以来的继承性抬升,开始在凸起边缘接受东营组三角洲相沉积,至新近系凸起整体沉降,大面积接受馆陶组辫状河和明化镇组曲流河

沉积^[10]。其中馆陶组 III 油组发育近 120 m 厚的辫状河砂体, 构造高部位发育平均厚度 19 m 的油层, 为强底水稀油油藏, 储层平均孔隙度 26.3%, 平均渗透率 1600 mD, 属于高孔高渗储层。C 油田是中外多方合作开发的大型亿吨级油田群中的主力油田之一, 也是渤海海域首次全部采用水平井开发(图 1c)且以单个油藏作为开发层系的油田^[11], 经过多年的开发, 目前已进入高含水、高采出程度阶段^[12], 面临着水淹程度加剧、产量递减快、剩余油预测难度大等一系列问题, 为降低油田综合调整方案的井位部署风险, 明确储层砂体的空间分布特征及其规模, 对储层构型的精细解剖有了更高的要求。

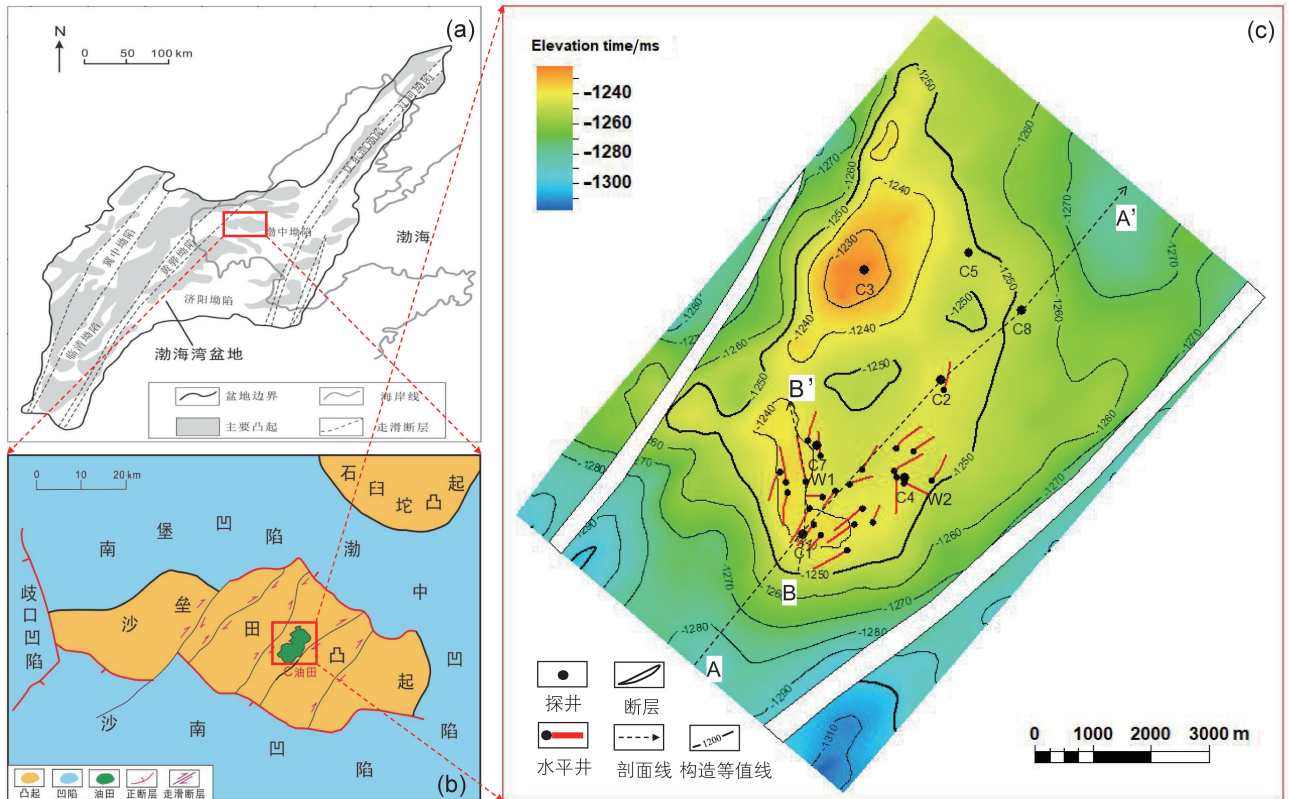
目前馆陶组 III 油组共钻井 44 口, 含水平井 29 口, 油田测井丰富, 包含自然伽马、电阻率、声波、中子、密度等常规测井项目, 高分辨三维地震资料覆盖整个研究区, 信噪比 0.96, 面元 25×12.5 m, 采样间隔 2 ms, 频宽 10~100 Hz, 主频 55 Hz, 以 3000 m/s 的速度计算, 纵向分辨率大约为 13 m, 满足馆陶组 III 油组的储层预测基础。

2 辫状河储层沉积特征及构型单元划分

储层构型是指不同级次储层构型单元的形态、规模、方向及其叠置关系, 储层构型要素为沉积体的基本构成单元, 不同构型单元具有独特的成因机制^[13]。应用岩心观察与已有钻井的测井相分析, 参考 Miall(1985)构型分级, C 油田馆陶组 III 油组为一套辫状河沉积, 四级储层构型单元主要包括两种, 即心滩和辫状河道储层构型单元。

2.1 心滩

当河水流速降低, 沉积物在河床底部堆积逐渐形成心滩, 在洪水期间沉积物垂向加积, 心滩规模不断增大, 是辫状河储层中最主要的构型单元。馆陶组 III 油组心滩单层砂体厚度较大(6~15 m), 以灰色中粗砂岩为主, 底部一般含细砾(图 2a), 心滩块状构造、波状交错层理(图 2b)和槽状交错层理(图 2c)发育, 垂向上表现为正韵律和均质韵律; 测井曲线呈高幅箱形, 底部突变, 反映强水动力条件的沉积特征, 整体物性



(a) 沙垒田凸起构造位置; (b) C 油田构造位置; (c) C 油田馆陶组 III 油组顶面构造图及井位分布图

图 1 C 油田构造位置及井位分布图

Fig. 1 Structural location and well location distribution of C oilfield

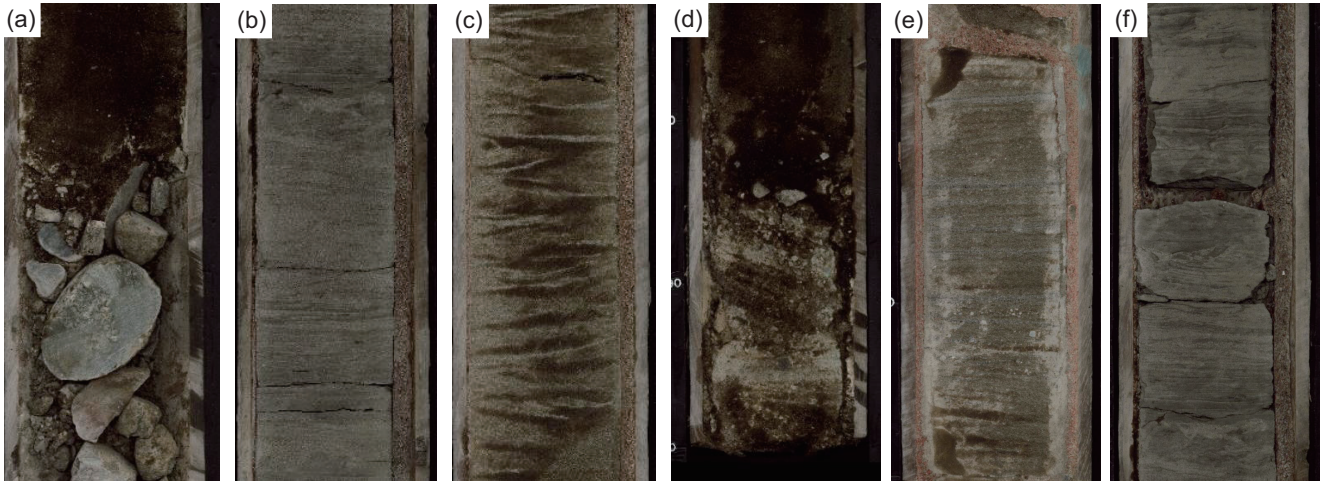


图2 C油田辫状河四级构型单元岩心相特征

Fig. 2 Core characteristics of braided river level 4 architecture units in C oilfield

较好。

(a) 心滩构型单元, 底部砾岩, 砾石直径最大10 cm, C4井, 1424.55~1424.75 m;

(b) 心滩构型单元, 灰白色中砂岩, 波状交错层理, C4井, 1418.85~1419.05 m;

(c) 心滩构型单元, 灰色粗砂岩, 槽状交错层理, C4井, 1415.32~1415.52 m;

(d) 辫状河道构型单元, 底部含砾粗砂岩, C4井, 1371.73~1371.93 m;

(e) 辫状河道构型单元, 灰色粗砂岩, 平行层理, C4井, 1367.28~1367.48 m;

(f) 辫状河道构型单元, 软沉积物变形构造, C4井, 1364.85~1364.05 m。

2.2 辫状河道

辫状河道是砂砾质辫状河中的主要构型单元之一, 以灰白色粗砂岩和中砂岩为主, 粒度较心滩明显变细, 砂体厚度3~5 m, 底部界面不平整, 为冲刷界面, 发育分选较差的底砾岩(图2d), 见平行层理(图2e、槽状及板状交错层理, 发育软沉积物变形构造(图2f), 具有典型的河流相自下而上变细的正韵律特征, 顶部为泥岩段, 代表了河道发育的一个完整周期。测井曲线呈典型钟形的正序列结构, 反映了水动力逐渐减弱和砂质供给物减少的沉积特征, 物性较心滩差。

单一的四级构型单元垂向组合形成的复合砂体构成五级构型单元, 根据岩心相及测井响应特征, 以C4井为例, 馆陶组Ⅲ油组垂向上可划分为3个五级构型单元, 五级构型界面(河道充填复合砂体构型界面)为辫状河道顶部泥岩、心滩或辫状河道底部冲刷面, 测井曲线回返较明显, GR靠近泥岩基线, 具有低

密度、高中子等特征。河道充填复合砂体五级构型单元厚度约18.0~25.0 m, 底部为含砾石的粗粒沉积, 测井曲线形态为微齿化较平直的箱状, 内部根据次级的沉积界面多划分为2期垂向叠置的单一心滩四级构型单元, 在五级构型单元顶部发育的2期河道四级构型单元, 岩心揭示垂向为正粒序, 厚度分别为3.2 m和4.3 m(图3)。

3 三维地震分频 RGB 融合原理

分频RGB融合是将三维地震进行分频处理得到的互不重叠的低频段、中频段、高频段地震分频体以RGB模式混合显示^[14], 包括地震分频和RGB融合两大技术。分频技术通过获取地震道每个采样点的频谱图像, 实现从时间和空间变化角度分析砂体的垂向厚度变化规律及横向连续性^[15], 进而提高不同类型地质体的识别精度, 降低超限储层的多解性。利用RGB混色模式将多个分频体融合, 通过颜色混合效果来突出各分频体中能量具有近似特征的区域, 进而有效提高单一频率成分对目标的分辨效果^[16]。

3.1 频谱分解原理

频谱分解技术是利用数学变换将地震信号从时间域转换到频率域, 在频率域内对储层进行刻画避免了时间域内不同频率的相互干扰, 对厚层砂岩及薄储层都有很好的识别能力。短时窗傅立叶变换法(STFT)、连续小波变换(CWT)和S变换(ST)是目前常用的分频技术方法。S变换是STFT变换与CWT变换的结合, 通过S变换可以同时从时域以及频率域观察一个信号的能量分布与特征, 不会丢失任何信息^[17-18], 并且S

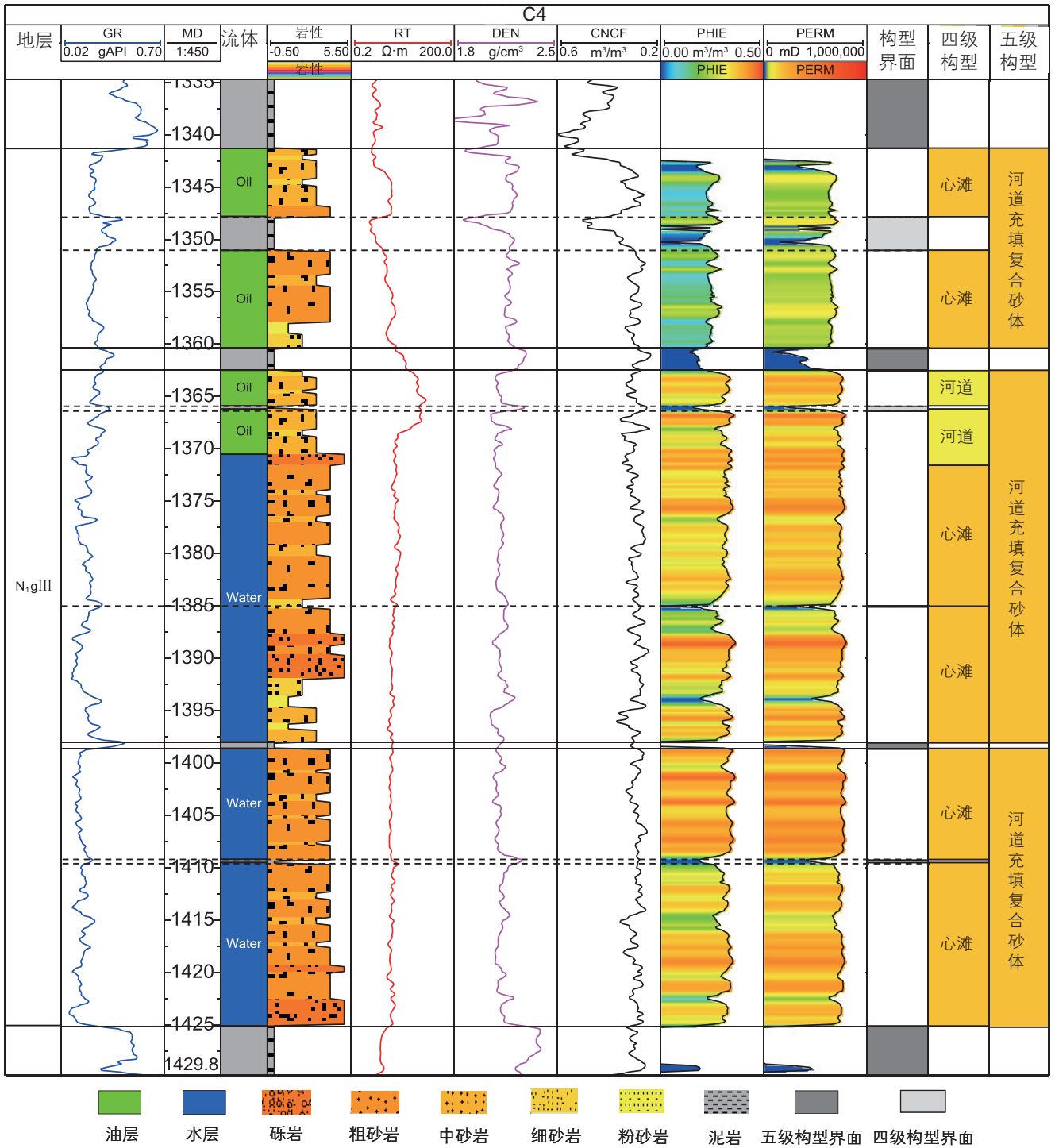


图3 C4取心井馆Ⅲ油组储层构型综合解释柱状图

Fig. 3 C4 comprehensive interpretation histogram of reservoir configuration of N₁g III oil group in coring well

转换方法频谱分析效率高，对各频率属性分析细致，本次地震分频拟采用该方法。其计算公式为：

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(t-\tau)^2}{2}} e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

式中， $S(\tau, f)$ 为复合时频谱，Hz； $s(t)$ 为输入地震道； f 为频率，Hz； t 为时间； τ 为时间轴上高斯窗口的中心

位置，ms。

S变换为线性变换既综合了短时窗傅里叶变换时频分辨率高的优点，又综合了小波变换的高分辨率特性，在运算过程中即可调整垂向时间分辨率也可调整频率分辨率。

3.2 RGB融合原理

RGB是最常见的色彩组合模式,三个字母分别代表红、绿和蓝三种成分颜色。每种基色对应0~255个等级,任何一种颜色都可以通过基色调融合生成,融合算法的数学模型为 $\{(R, G, B)|0 \leq R \leq 255, 0 \leq G \leq 255, 0 \leq B \leq 255\}$ 共能定义出 $256 \times 256 \times 256 = 16\,777\,216$ 种颜色^[19]。

当 $R=G=B$ 时,产生灰色阴影;当 $R=G=B=255$ 时,结果为纯白色;当 $R=G=B=0$ 时,结果为纯黑色。一般情况下,在事先对原始数据体进行频谱分析后,确定原始数据体的主频作为中频(G),然后是向低频部分(R)为低频信息,向高频部分(B)为高频信息。通过融合切片上色标亮度反映岩性变化,色度反映厚度变化,从而达到区分不同地质体的目的。

3个分频地震体融合的关键是将不同单一频带地震体振幅值($V_i, i=1,2,3$)通过某种T变换一一映射成IR, IG和IB三种颜色,即:

$$[IR(z), IG(z), IB(z)] = T[V_1(z), V_2(z), V_3(z)] \quad (2)$$

式中, z 代表某单一频带地震体振幅值的空间位置;IR, IG和IB值为0~255。

本文中T变换采用的是一阶线性变换^[14],即:

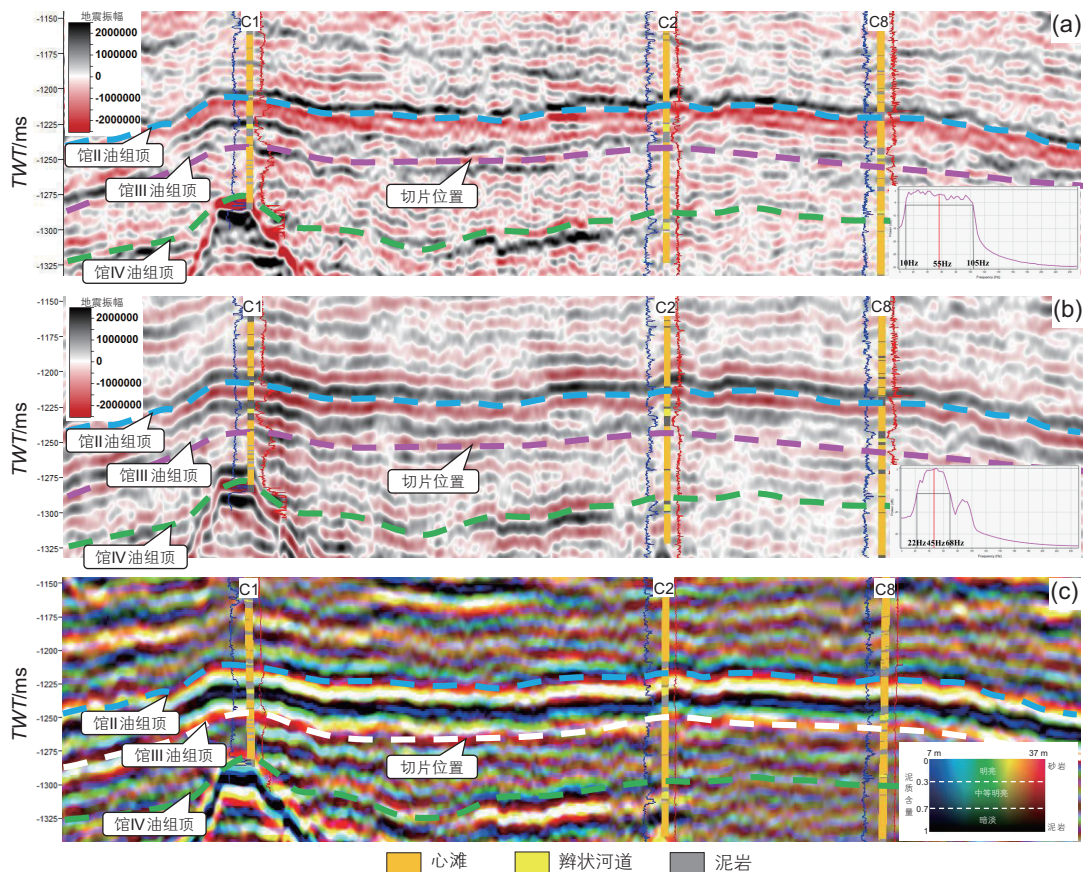
$$T = [(v_i - v_{\min}) / (v_{\max} - v_{\min})] \times 255 \quad (3)$$

式中, v_i 为 V_i 中的一分量值; v_{\min} 和 v_{\max} 分别为 V_i 分量的最小值和最大值。

RGB融合技术能更直观突出储层内部的细微结构,尤其是提高了复杂相带中薄互层解释的精度,并逐渐成为高精度储层描述的有效手段^[20]。

3.3 分频RGB效果分析

根据研究区中辫状河单个砂体的厚度分布规律(3~50 m),选取合适的地震分频频率,高频地震数据用来刻画薄层砂岩,低频地震数据适用于厚层砂岩^[21],本次研究中首先对原始地震数据进行 -90° 相移处理,建立地震同相轴和沉积体之间的对应关系,直观展现调谐范围内的储层厚度变化特征及内部结构



(a) -90° 相移地震剖面; (b) 45 Hz分频地震剖面; (c) 分频RGB融合剖面

图4 过C1~C8井 -90° 相移地震、45 Hz分频地震剖面 and 分频RGB融合处理剖面图(剖面线见图1c中AA')

Fig. 4 The profile of well C1~C8 of -90° phase shift seismic and frequency-fused seismic attribute with RGB color-blending(Fig. 1c AA' for location)

(图 4a), 其中经过 45 Hz 分频处理后剖面与全频地震剖面相比, 同相轴连续性增强, 垂向分辨率有所提高, 对中等厚度砂岩有较好的响应(图 4b)。通过原始地震资料的主频和频宽优先确定中等频带(40~50 Hz), 之后分别在 10~40 Hz 和 50~105 Hz 范围内确定低频和高频的分频数据体, 经过反复试验, 结合已钻井的实测砂体资料, 分别选取 30 Hz、45 Hz 和 65 Hz 分频地震数据体进行 RGB 融合, 其中红色、绿色和蓝色表示厚层(30~40 m)、中等(20 m)和薄层(<10 m), 颜色的亮度衡量泥质含量高低^[5], 结合图 4c 的井震标定结果, 对于定性解释, RGB 融合体的色调越暗, 泥质含量越高, 明亮的, 中等明亮的和暗淡的融合结果分别表示纯砂岩(泥质含量小于 0.3)、泥质砂岩(泥质含量介于 0.3 和 0.7 之间)和泥岩(泥质含量大于 0.7)(图 4c)。当融合过程中某些强反射同相轴的中心位置同时保留了纯蓝色、纯绿色、纯红色信息时, 即 $R=G=B=255$, 三者融合后形成白色, 亮度高, 代表厚层砂岩沉积中心较为纯净的岩性部分。

利用研究区中 8 口探井资料, 提取馆 II~馆 IV 油组内单个砂体厚度, 准确井震标定后在分频 RGB 融合体上统计与井上单个砂体对应的明亮和中等明亮颜色的时间厚度, 结果表明探井实测砂体厚度与地震预测厚度二者具有很强的相关性(图 5)。65 Hz 的高频率和 30 Hz 的低频率分别对应的调谐厚度是 7 m 和 37 m, 在该调谐厚度范围之间, 其相关系数达到 0.75。超出 7~37 m 的有效识别范围时, 二者相关关系变差, 但总体正相关趋势仍然存在。

在对馆 III 油组顶精细地震解释基础上, 对分频

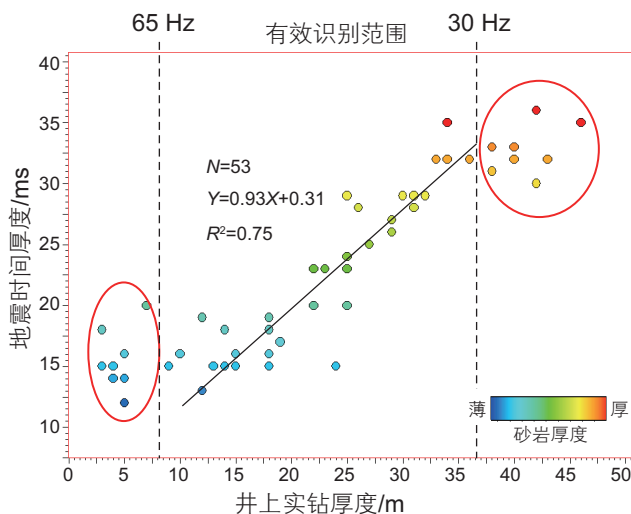


图 5 探井实测砂体厚度与地震预测厚度的相关关系

Fig. 5 Correlation between measured sand body thickness of exploration well and seismic predicted thickness

RGB 融合数据进行地层切片分析平面融合效果, 在 30 Hz、45 Hz 和 65 Hz 这个频带组合模式下, 工区范围内南北 2 条呈亮红色的复合砂体带清晰可见, 色彩突出, 表明厚砂体较为发育, 其中南侧复合砂体带也是水平井布井的集中区, 从实钻井揭示来看, 砂体发育程度较高, 平均钻遇率达到 80% 以上, 局部的泥岩与暗色调对应性较为一致(图 6), 分频 RGB 融合结果预测的砂泥岩分布规律及砂体边界与实钻井相比二者较为一致, 其中在 C4-W2 井连井剖面上, W2 水平段主体位于 C4 井揭示的海拔 -1350 m 处的厚层心滩砂体, 在分频 RGB 融合切片上表现为亮红色, 井震匹配关系较好(图 7)。根据此融合结果, 可进一步对平面构型进行刻画。

4 分频 RGB 融合和水平井联合约束的辫状河储层构型解剖

4.1 水平井构型精细解剖

水平井由于横向延伸距离长, 往往钻遇多个构型单元, 据此可以利用水平井丰富的横向信息, 定位构型单元边界。W1 井水平段主要为心滩沉积, 测井曲线更加饱满, 自然伽马在 55~80 gAPI 之间, 电阻率大

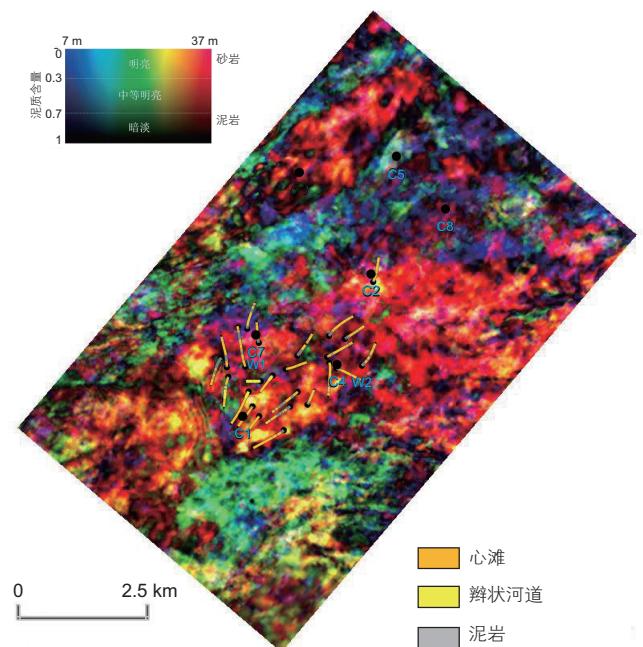


图 6 馆 III 油组 30 Hz、45 Hz 和 65 Hz 分频地震体的 RGB 融合效果

Fig. 6 Frequency-fused seismic attribute of 30 Hz, 45 Hz and 65 Hz frequency divided seismic in Nig III oil group

于 5Ω ，偶有回返代表心滩内部落淤层沉积；而河道由于粒度偏细，自然伽马和电阻率曲线明显异于心滩，在构型边界处自然伽马曲线和自然电位回返幅度显著大(图 8)，测井曲线回返部位的长度则指示河道的规模，规模较大的可在分频融合结果中找到对应的颜色响应特征。

4.2 过水平井RGB分频融合剖面储层构型单元精细刻画

在过W1井的地震剖面上，该井水平段主要位于波谷内，周围地震相以中强振幅高频中等连续性的平行-亚平行为主，其中辫状河道地震相与两侧地震相差别较大，有顶平底凸的形态(图 9a)。经过 30 Hz、45 Hz 和 65 Hz 频带组合的RGB融合，除了W1井大斜度段的砂泥岩电测揭示与融合效果的吻合度较高外，水平段也具有相似的响应特征，在跟部主要呈色彩饱满的红色，代表砂体厚度较大的心滩沉积，砂质辫状河道底部略显暗色调，顶部强亮色调，整体与两侧表

现出不连续的痕迹，向趾部钻遇大段泥岩(108 m)，融合颜色转变为淡绿色和蓝色，表明储层发育程度有变差的趋势(图 9b)。在过C1~W1井剖面上，主要划分为5个四级构型单元，侧向上表现为心滩-辫状河道-心滩拼接样式(图 9c)，W1井钻遇的心滩主要以红绿色调为主，其中靠近趾部的泥岩段在RGB融合剖面中对应蓝色调，为泥质河道沉积。结合探井及水平井实钻信息，根据辫状河沉积模式，心滩内部的落淤层主要在顶部平行分布，与泥质河道不同，冲沟对心滩的切割程度仅限于心滩中上部，但是对储层的连通性也起到一定控制作用。

4.3 基于RGB分频融合切片储层构型单元平面分布预测

馆III油组顶部的分频RGB融合地层切片中亮红色的区域代表辫状河砂体分布的核心区，砂体厚度大，识别出①~⑥共6条NEE-SWW向分布的主体复合砂体带，解释为五级构型单元，其边界清晰，向

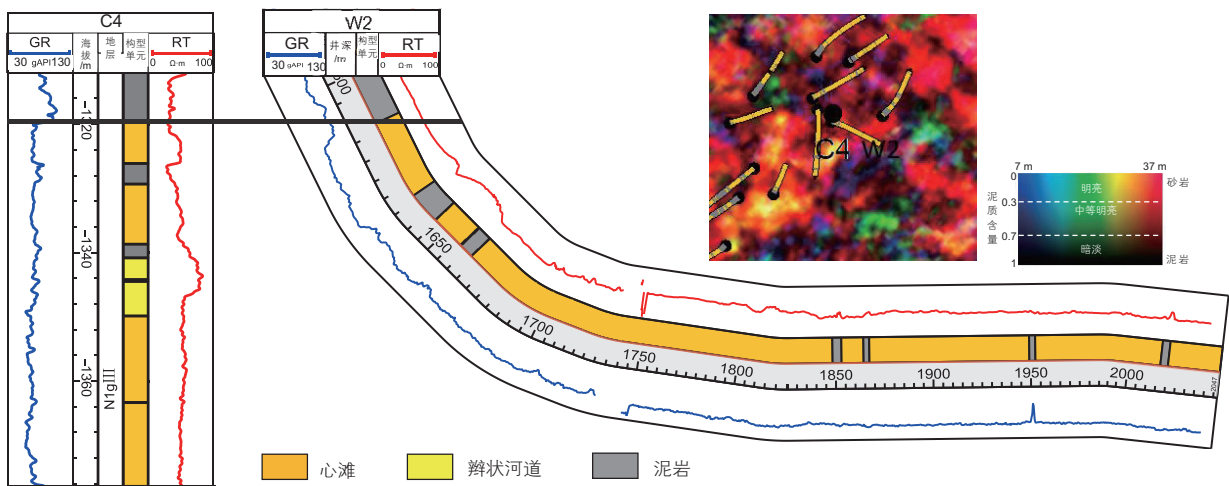


图 7 馆III油组过C4-W2井连井剖面

Fig. 7 Cross section of connecting well C4-W2 of N_{1g} III oil group

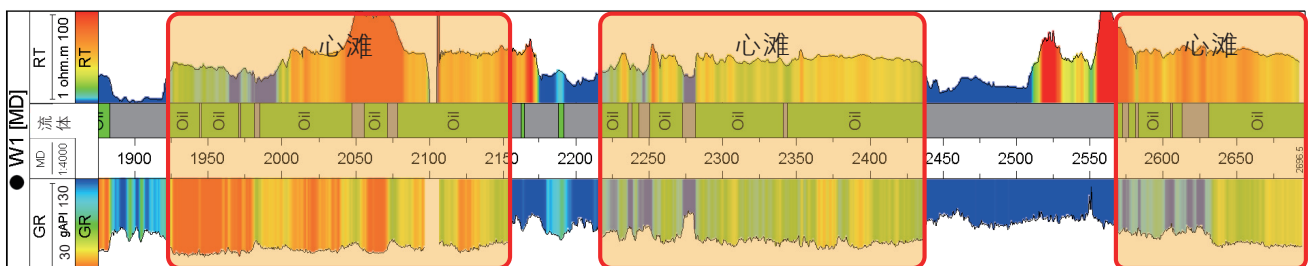
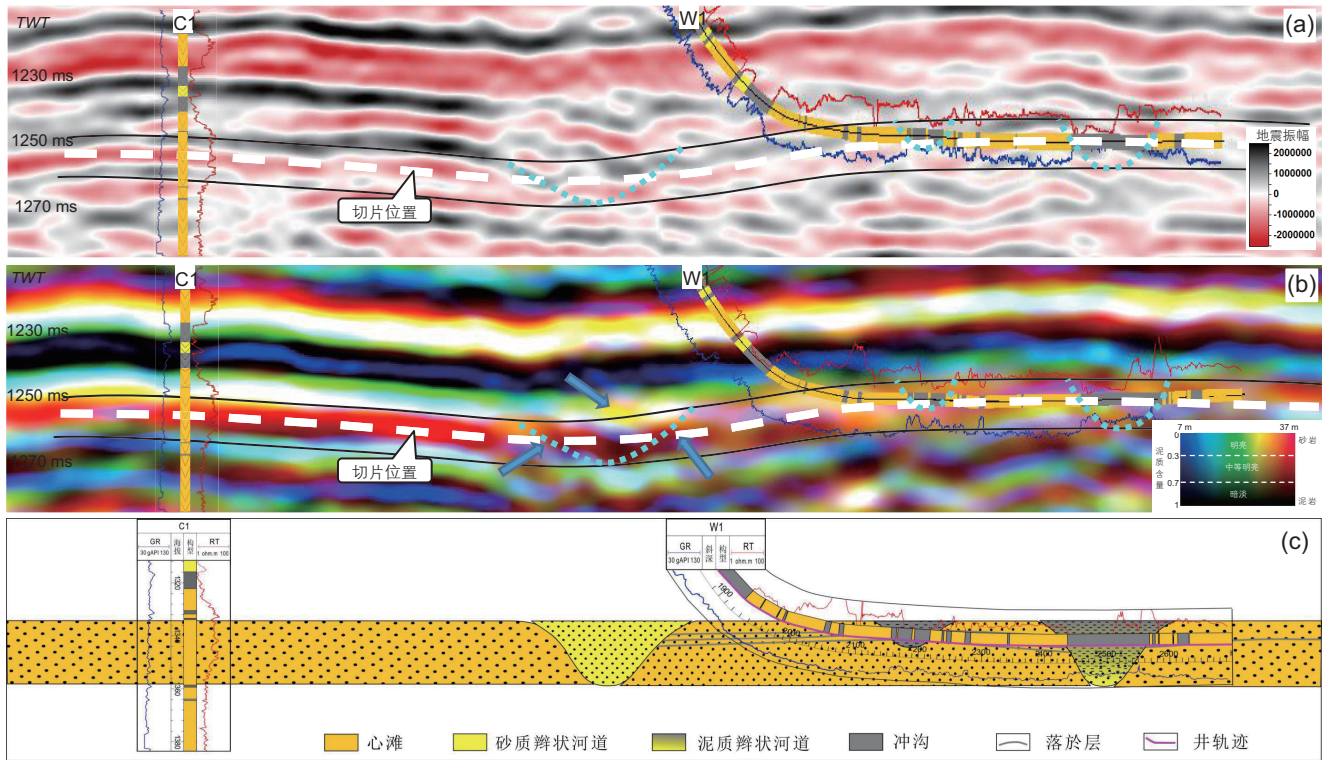


图 8 水平井W1井心滩构型单元识别

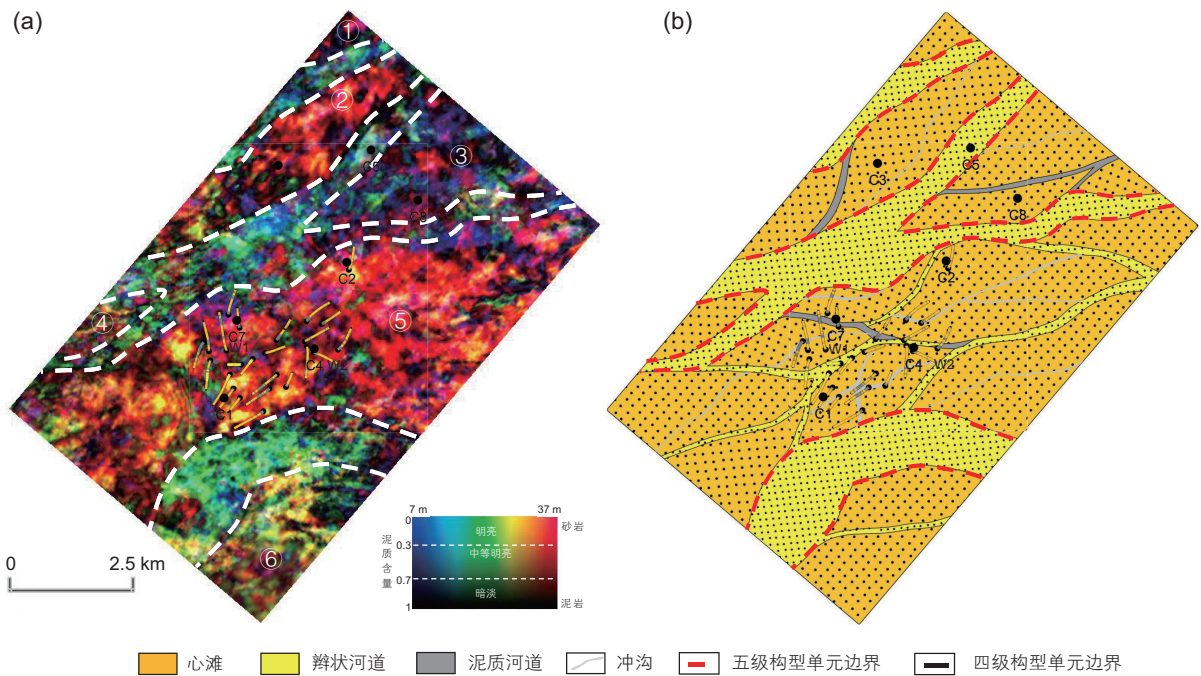
Fig. 8 Braided bars architecture unit identification of W1 horizontal well



(a) -90° 相移地震剖面; (b) 分频 RGB 融合剖面; (c) 过 C1~W1 井四级构型剖面图

图 9 基于水平井信息、 -90° 相移地震和分频 RGB 融合处理的四级构型剖面图 (剖面线见图 1c 中 BB')

Fig. 9 Profile architecture analysis based on horizontal well, -90° phase shift seismic and frequency-fused seismic attribute with RGB color-blending (Fig. 1c BB' for location)



(a) 分频 RGB 融合切片及五级构型单元边界探测; (b) 四级构型平面分布图

图 10 馆 III 油组水平井和分频 RGB 融合联合约束的辫状河储层构型平面分布图

Fig. 10 Planar architecture analysis of braided river reservoir constrained by horizontal well and frequency-fused seismic attribute of N₁g III oil group

外侧突变为暗绿色和蓝色,其中②号复合砂体带宽度约1500 m,⑤号复合砂体带规模最大,宽度可达3000 m,也是布井的主体区(图10a)。

结合水平井构型边界探测结果,参考现代辫状河“宽坝窄河”的沉积样式,以五级构型单元内部RGB分频融合切片上线状暗色响应作为次一级构型单元边界,分别对①~⑥五级构型单元复合砂体进行四级构型单元划分,其中⑤号复合心滩五级构型单元进一步划分出8个单一心滩四级构型单元,呈NEE-SWW向分布,宽度在1500~2000 m之间,长度在2000~3500 m之间,平面上辫状河道四级构型单元呈“窄条带状”环绕心滩,宽度在100~300 m之间,在分频RGB融合切片中红色高亮度区域中,发育高泥质含量的暗色线条状响应区域,结合水平井实钻储层和泥岩分布特征,在辫状河沉积模式的约束下刻画心滩四级构型内部的冲沟和泥质河道,平面上呈平行、“人”字或“X”形排列,宽度在20~100 m之间,在心滩内部起到一定的渗流屏障作用,使得心滩内部连通性复杂化(图10b)。

基于分频RGB融合和水平井信息的辫状河储层构型单元刻画,克服了单一频带和单一色彩显示沉积特征信息不足的缺点,提高了提取地质体和探测边界的能力,对于超限储层的预测具有一定优势,系统将岩性-厚度-构型的关系耦合起来,在C油田综合调整阶段得到有效应用,部署27口井全部投产后,单井平均产能达110方/天,预测该底水油藏采收率达49.6%,

为相似油田的开发提供了宝贵经验。

5 结论

(1) C油田馆陶组III油组属辫状河沉积,主要发育心滩和辫状河道两种类型四级构型单元,其中心滩以中粗粒砂岩为主,单层厚度大,发育波状、槽状等多种类型交错层理,整体物性较好,是研究区主要发育的储层构型单元。

(2) 对C油田三维地震资料进行了分频处理,优选的30 Hz、45 Hz和65 Hz三套分频地震体进行RGB融合,能直观突出不同构型单元厚度的变化规律的边界响应特征,在分频RGB融合对砂体厚度有效识别范围内,井上实钻与融合体反映的砂体厚度具有较好的正相关性,从而建立分频RGB融合技术与砂体分布规律的合理相关关系。

(3) 在水平井信息和分频RGB融合技术的联合约束下,刻画出辫状河道四级构型单元呈窄条带状将心滩分割,单一心滩四级构型单元平面上呈NEE-SWW向分布,宽1500~2000 m,长2000~3500 m,内部发育平行、“人”字或“X”形排列的冲沟。分频RGB融合技术与水平井信息相结合的储层构型单元精细表征,较为清晰揭示了不同构型单元的连通关系以及构型单元之间渗流屏障的分布规律,为油田综合调整方案的优化提供了直接的地质依据。

参考文献

- [1] 李顺明, 宋新民, 蒋有伟, 等. 高尚堡油田砂质辫状河储集层构型与剩余油分布[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(04): 474-482. [LI S M, SONG X M, JIANG Y W, et al. Architecture and remaining oil distribution of the sandy braided river reservoir in the Gaoshangpu oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 2011, 38(04): 474-482.]
- [2] 孙天建, 穆龙新, 吴向红, 等. 砂质辫状河储层构型表征方法——以苏丹穆格莱特盆地Hegli油田为例[J]. 石油学报, 2014, 35(04): 715-724. [SUN T J, MU L X, WU X H, et al. A quantitative method for architectural characterization of sandy braided-river reservoirs: taking Henli oilfield of Muglad Basin in Sudan as an example[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(04): 715-724.]
- [3] 权勃, 侯东梅, 牟松茹, 等. 基于水平井信息的辫状河储层构型单元空间展布研究[J]. 中国海上油气, 2020, 32(04): 96-103. [QUAN B, HOU D M, MOU S R, et al. Study on configuration unit spatial distribution of braided river reservoirs based on horizontal well information[J]. China Offshore Oil and Gas, 2020, 32(04): 96-103.]
- [4] 朱筱敏, 董艳蕾, 曾洪流, 等. 中国地震沉积学研究现状和发展思考[J]. 古地理学报, 2020, 22(03): 397-411. [ZHU X M, DONG Y L, ZENG H L, et al. Research status and thoughts on the development of seismic sedimentology in China[J]. Journal of Palaeogeography, 2020, 22(03): 397-411.]
- [5] ZENG H. Thickness imaging for high-resolution stratigraphic interpretation by linear combination and color blending of multiple-frequency panels[J]. Interpretation (Tulsa), 2017, 5(3): T411-T422.
- [6] 马世忠, 何伟, 王昭. 基于地震分频技术的河道砂体精细刻画[J]. 黑龙江科技大学学报, 2015, 25(04): 411-416. [MA S Z, HE W, WANG Z, et al. Fine characterization of channel sand body based on seismic frequency dividing technique [J]. Journal of Heilongjiang University of Science & Technology, 2015, 25(04): 411-416.]

- [7] 李婷婷, 王钊, 马世忠, 等. 地震属性融合方法综述[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(01): 378–385. [LI T T, WANG Z, MA S Z, et al. Summary of seismic attributes fusion method[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(01): 378–385.]
- [8] ZENG H. What is seismic sedimentology? A tutorial[J]. Interpretation (Tulsa), 2018, 6(2): D1–D12.
- [9] 刘强虎, 朱筱敏, 李顺利, 等. 沙垒田凸起前古近系基岩分布及源-汇过程[J]. 地球科学, 2016, 41(11): 1935–1949. [LIU Q H, ZHU X M, LI S L, et al. Pre-Palaeogene bedrock distribution and source-to-sink system analysis in the Shaleitian Uplift [J]. Earth Science, 2016, 41(11): 1935–1949.]
- [10] 石文龙, 张志强, 彭文绪, 等. 渤海西部沙垒田凸起东段构造演化特征与油气成藏[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(02): 242–247. [SHI W L, ZHANG Z Q, PENG W X, et al. Tectonic evolution and hydrocarbon accumulation in the east part of Shaleitian Sailent, western Bohai Sea[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(02): 242–247.]
- [11] 汪巍, 权勃. 侧积夹层研究及在渤海河流相水油藏中的应用——以曹妃甸 11-1 油田为例[J]. 石油地质与工程, 2014, 28(05): 66–68. [WANG W, QUAN B. Application of lateral accretion interlayer study in fluvial edge water reservoirs of Bohai oilfield[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2014, 28(05): 66–68.]
- [12] 黄晓东, 黄荣贵, 刘晖, 等. 底水稠油油藏水平井生产特征及产能预测研究——以渤海曹妃甸 11-1 油田为例[J]. 石油化工应用, 2015, 34(09): 26–31. [HUANG X D, HUANG R G, LIU H, et al. Bottom water reservoir with horizontal well production characteristics and productivity prediction of heavy oil[J]. Petrochemical Industry Application, 2015, 34(09): 26–31.]
- [13] 吴胜和, 纪友亮, 岳大力, 等. 碎屑沉积地质体构型分级方案探讨[J]. 高校地质学报, 2013, 19(1): 12–22. [WU S H, JI Y L, YUE D L, et al. Discussion on hierarchical scheme of architectural units in clastic deposits[J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(1): 12–22.]
- [14] 丁峰, 年永吉, 王治国, 等. 地震多属性 RGBA 颜色融合技术的应用研究[J]. 石油物探, 2010, 49(03): 248–252. [DING F, NIAN Y J, WANG Z G, et al. Application of seismic multi-attributes RGBA color blending[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2010, 49(03): 248–252.]
- [15] 张延章, 尹寿鹏, 张巧玲, 等. 地震分频技术的地质内涵及其效果分析[J]. 石油勘探与开发, 2006(01): 64–66. [ZHANG Y Z, YIN S P, ZHANG Q L, et al. Geologic significance of the seismic spectral decomposition technology and its application analysis[J]. Petroleum Exploration and Development, 2006(01): 64–66.]
- [16] 曹向阳, 张金森, 韩文明, 等. 利用信息融合技术整合地震分频信号的方法及应用研究[J]. CT理论与应用研究, 2012, 21(04): 625–633. [CAO X Y, ZHANG J M, HAN W M, et al. Research of using information fusion technology to integrate seismic decomposition spectrum signals and its application[J]. CT Theory and Applications, 2012, 21(04): 625–633.]
- [17] 陈国飞, 吕双兵. RGB分频技术在断块油藏断层识别中的应用[J]. 复杂油气藏, 2015, 8(02): 29–32. [CHEN G F, LV S B. Application of RGB frequency division technology in the fault identification of fault-block reservoir[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2015, 8(02): 29–32.]
- [18] 马跃华, 吴蜀燕, 白玉花, 等. 利用谱分解技术预测河流相储层[J]. 石油地球物理勘探, 2015, 50(03): 502–509. [MA Y H, WU S Y, BAI Y H, et al. River sedimentary microfacies prediction based on spectral decomposition[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2015, 50(03): 502–509.]
- [19] 曹鉴华. RGB混频显示技术及其在河道识别中的应用[J]. 勘探地球物理进展, 2010, 33(05): 355–358. [CAO J H. RGB color blending and its application in channel recognition[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2010, 33(05): 355–358.]
- [20] 丁继才, 姜秀娣, 翁斌, 等. 基于物理小波时频分析及RGB分频混色的高精度频谱成像技术优势分析及应用[J]. 中国海上油气, 2015, 27(05): 27–30. [DING J C, JIANG X D, WENG B, et al. Advantage and application of high precision spectrum imaging technology based on physical wavelet time-frequency analysis and spectrum decomposition RGB plotting[J]. China Offshore Oil and Gas, 2015, 27(05): 27–30.]
- [21] ZENG H, ZHU X, LIU Q, et al. An alternative, seismic-assisted method of fluvial architectural-element analysis in the subsurface: Neogene, Shaleitian area, Bohai Bay Basin, China[J]. Marine and petroleum geology, 2020, 118: 104435.