

# 哥伦比亚 Llanos 盆地东部油田 Carbonera 组 C<sub>5</sub> 段 河道砂岩地震识别与预测

郑连弟<sup>1</sup>, 杨江峰<sup>1</sup>, 袁联生<sup>1</sup>, 杨勤林<sup>1</sup>, 冯方<sup>2</sup>, 李洋<sup>1</sup>,  
马永强<sup>1</sup>, 胡俊峰<sup>2</sup>

(1. 中国石化石油物探技术研究院, 江苏 南京 211103;

2. 中国石化集团国际石油勘探开发有限公司, 北京 朝阳 100029)

**摘要:** 哥伦比亚 Llanos 盆地东部的中新世 Carbonera 组属于三角洲前缘相沉积。Carbonera 组内部的水下分流河道砂体是良好的储层, 因此对河道的精细刻画有利于指导下一步的油气勘探和开发。研究通过波动方程波场正演模拟建立了河道砂岩储层的地震识别模式, 并利用地震沉积学 RGB 混频地层切片以及沿层地震振幅属性对河道的形态、发育期次、以及砂体的平面分布进行了详细的研究。在此基础上, 利用约束稀疏脉冲反演和地质统计学反演研究定量描述了河道砂体的孔隙度和厚度。最终对五条有利的河道砂岩性圈闭进行了详细的描述, 研究区河道的宽度为 322 ~ 830 m, 砂岩最厚可达到 35.05 m, 这些河道砂体可为有利勘探目标区。区内钻探的 W2 井证实了该技术方法的有效性和储层描述结果的可靠性, 为研究区下步的油气勘探开发提供新方向。

**关键词:** Llanos 盆地; 河道砂岩; 正演模拟; RGB 混频; 储层反演

中图分类号: P618.13; P631.4

文献标识码: A

## SEISMIC IDENTIFICATION AND PREDICTION OF C5 CHANNEL SANDSTONE IN THE CARBONERA FORMATION, LLANOS BASIN, COLOMBIA

ZHENG Liandi<sup>1</sup>, YANG Jiangfeng<sup>1</sup>, YUAN Liansheng<sup>1</sup>, YANG Qilin<sup>1</sup>, FENG Fang<sup>2</sup>, LI Yang<sup>1</sup>,  
MA Yongqiang<sup>1</sup>, HU Junfeng<sup>2</sup>

(1. Geophysical Research Institute, SINOPEC, Nanjing 211103, Jiangsu, China;

2. International Petroleum Exploration and Production Corporation, SINOPEC, Beijing 100029, China)

**Abstract:** The channels developed in the Miocene Carbonera formation in the eastern part of the Llanos basin, Columbia, are so favorable reservoir that the accurate descriptions for these channels are key issues in this area. Guided by the simulation of wave equation, the seismic identification mode for channel sand is established. The distribution of the channels is then predicted with RGB mixing frequencies data slices and sensitive attributes. Eventually, the thickness and porosity of sand body are quantitatively described, using constrained sparse impulse inversion and geostatistical inversion. In our study, five favorable lithologic traps of channel sandstone are described in detail. The width of channel is about 322 ~ 830 m, and the thickness for channel sand (with porosity larger than 18%) is 35.05 m,

which make this channel sand favorable prospecting areas. The result of the drilling W2 verifies the validity of the technique and the reliability of the reservoir description, which provides a new direction for exploration and development in the next step.

**Key words:** the Llanos Basin; channel sandstone; forward modeling; RGB mixing; reservoir inversion

## 0 引言

哥伦比亚 Llanos 盆地中新世 Carbonera 组的河道砂体是良好的油气储层和油气勘探有利区域<sup>[1-3]</sup>, 近年来, 相关学者对这套河道砂体开展了一系列的研究, 包括油气成藏分析、构造演化分析以及储层预测等<sup>[4-5]</sup>。Moncayo 等<sup>[6]</sup>基于二维地震资料利用叠前反演技术认识到 Carbonera 组的河道砂岩储层中存在砂泥岩隔层, 但缺乏相应钻井资料的补充和验证。Miguel 等<sup>[7]</sup>利用弹性参数反演技术对河道砂体开展了储层预测、储层含流体性质预测等相关研究。针对地震振幅属性预测砂体厚度存在偏差的缺陷, 胡俊峰等<sup>[5]</sup>在楔状体正演模拟基础上, 利用频谱分解技术, 定性分析了不同主频下砂体调谐厚度的变化, 并利用波阻抗反演联井技术在一条连井地震剖面上分析了砂体厚度变化。

综上所述, 前期研究以储层定性预测为主, 但由于定性储层的预测很难满足井位部署的需求, 因此, 开展河道的形成期次分析、河道边界的精细刻画、河道的规模、储层物性等定量研究对于圈闭评价和井位目标优选具有重要的指导意义。研究通过波场正演模拟确定本区有利储层的地震响应特征, 根据 RGB 混频切片属性分析、地震振幅属性分析、波阻抗反演等技术, 预测目的层段有利储层的平面分布和砂体厚度, 在研究区内发现了 5 条有利的河道储层发育区域, 为将来的钻井部署提供依据。

## 1 地质背景

Llanos 盆地位于南美洲北部的哥伦比亚境内, 西以 Codillera 为界, 东以 Guiana Shield 为界, 南部以 Vaupes Arch 为界, 北部与委内瑞拉 Barinas Basin 相接, 面积  $2.25 \times 10^5 \text{ km}^2$ <sup>[2,8-10]</sup>。Llano 盆地基底为前寒武纪结晶基底, 上覆古生界、白垩系和古近系、新近系。白垩系包括 Une 组、Gacheta 组和 Guadalupe 组, 古近系和新近系包括

Barco 组、Cuervos 组、Mirador 组、Carbonera 组、Leon 组和 Guayabo 组<sup>[6]</sup>, 其中 Gacheta 组海相页岩是盆地的主要烃源岩, Mirador 组和 Carbonera 组是盆地主要含油层系, 中新统 Leon 组为区域性的盖层。

研究区位于 Llanos 盆地东部斜坡带, 主要含油层系为三角洲前缘沉积的 Carbonera 组, 自上而下该组被分为  $C_1$ — $C_8$  共 8 个段, 其中  $C_1$ 、 $C_3$ 、 $C_5$  和  $C_7$  段以砂岩为主,  $C_2$ 、 $C_4$ 、 $C_6$  和  $C_8$  段以泥岩为主 (见图 1)。其中  $C_5$  段又被细分为  $C_{5-a}$ 、 $C_{5-b}$  和  $C_{5-c}$  三个小层, 研究区主力产油层位为  $C_{5-c}$ 。

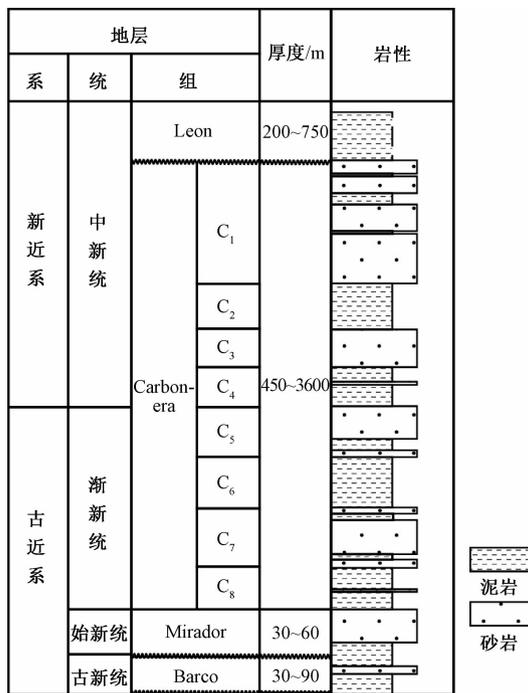


图 1 Llanos 盆地东部斜坡带 Carbonera 组地层岩性柱 (据文献 [9] 修改)

Fig. 1 Lithologic histogram of the Carbonera Group in the eastern slope zone of the Llanos Basin (modified after [9])

研究区有三维地震资料  $40 \text{ km}^2$ , 地震资料记录长度 4 s, 采用叠前时间偏移处理, 面元  $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ , 目的层段 Carbonera 组的主频为 38 Hz。研究收集到 1 口完钻井 (W1 井) 资料, 包括测井 (伽马 (GR)、声波时差 (AC)、密度 ( $\rho$ )、电阻率 (RD))、油气测试和岩性描述记录。该井钻遇  $C_{5-c}$ 。

砂岩, 厚 35.36 m。测井资料显示, 这套砂岩上部的 10.36 m 为油层。

## 2 研究方法

研究利用工区内 40 km<sup>2</sup> 三维地震数据和 W1 井的资料, 以波动方程的地震波场模拟技术为指导, 建立河道砂岩储层的地震识别模式。波动方程正演模拟通过数值方法直接求解波动方程, 虽然计算速度比较慢, 但是不仅能够保持地震波的运动学特征, 还能够保证地震波的动力学特征, 得到的地震波场特征信息丰富, 更加符合实际地震波传播规律<sup>[11-12]</sup>。因此, 为了更精确地获得研究区内河道砂岩的地震响应特征, 研究通过波动方程波场特征正演模拟技术来建立河道储层的地震识别模式。

其次, 研究利用基于混频数据体的地层切片体确定河道的边界和走向, 以及鉴别河道的形成期次。生成混频数据体的具体步骤为: (1) 利用 Gabor 变换将地震数据分解成不同频段的振幅调谐数据体; (2) 利用 RGB 三原色融合的技术, 将分别用红、绿、蓝三种颜色表示的三种频率分量(低频、中频和高频)数据体融合形成一个具有混频信息的数据体<sup>[13-15]</sup>。上述方法的优势在于凸显不同主频数据体对于不同尺度地质体的分辨能力, 例如高频数据检测较小尺度的地质体, 低频数据体检测较大尺度的地质体<sup>[16-18]</sup>。这种方法更加有利于河道、碳酸盐岩缝洞储层、断裂等特殊地质异常体的识别<sup>[19-22]</sup>。

最后, 研究利用约束稀疏脉冲反演和地质统计学反演技术定量分析河道储层的孔隙度和厚度。约束稀疏脉冲反演(CSSI)是用地震道的振幅产生波阻抗模型, 采用一个快速的趋势约束脉冲反演算法, 用地震解释层位和测井约束控制波阻抗的趋势和幅值范围。上述脉冲算法产生了宽带结果, 恢复了缺失部分的低频和高频成分, 从而得到全频带的波阻抗数据体, 进而开展岩性预测<sup>[23-26]</sup>。地质统计学反演是一种将随机模拟理论与地震反演相结合的反演方法, 由两部分组成, 即随机模拟过程以及对模拟结果进行优化并使之符合地震数据的过程。其优势在于能够适当反映地层分布一定的规律性和随机性, 并且对这种不确定程度做出定量的评估, 在反演结果的分辨率

上有提高的空间<sup>[26-27]</sup>。通过以上几个研究步骤将研究区储层定性预测升级为定量描述研究。

## 3 研究结果

### 3.1 河道砂岩波场特征正演模拟

C<sub>5c</sub>是研究区的主力产油层位。根据 W1 井测井资料的统计(见表 1), 这套地层内部砂岩的波阻抗( $Z$ )为 6692.46 g·cm<sup>-3</sup>·m·s<sup>-1</sup>, 高于上覆 C<sub>4</sub> 段泥岩(6417.60 g·cm<sup>-3</sup>·m·s<sup>-1</sup>), 但低于下伏的 C<sub>6</sub> 段泥岩(7230.96 g·cm<sup>-3</sup>·m·s<sup>-1</sup>)。此外, 与上、下围岩相比较, C<sub>5c</sub>砂体具有高  $V_p$ 、低  $\rho$  的特征(见表 1)。通过将各套地层的真实速度和密度参数与地震剖面特征结合, 研究建立了研究区储层的地质模型(见图 2a)。

表 1 地层参数统计表

Table 1 Parameters for layers

层位	$V_p/$ (m/s)	$V_s/$ (m/s)	$\rho/$ (g/cm <sup>3</sup> )	$Z/$ (g·cm <sup>-3</sup> ·m·s <sup>-1</sup> )
C <sub>2</sub>	2540	1472	2.32	5892.8
C <sub>3</sub>	2822	2822	2.35	6631.70
C <sub>3-a</sub>	3175	1832	2.20	6985.00
C <sub>4</sub>	2674	1547	2.40	6417.60
C <sub>5-a</sub>	2931	1691	2.15	6301.65
C <sub>5</sub> 泥	2650	1534	2.41	6386.50
C <sub>5-c</sub> 油	3142	1812	2.13	6692.46
C <sub>5-c</sub> 砂	2771	1602	2.13	5902.23
C <sub>6</sub>	2988	1723	2.42	7230.96
C <sub>7</sub>	3048	1758	2.12	6461.76

注:  $V_p$ —纵波速度;  $V_s$ —横波速度;  $\rho$ —密度;  $Z$ —波阻抗

正演模拟的观测系统设置依据野外实际地震资料采集时的观测系统参数。炮间距: 50 m; 道间距: 50 m; 最大炮检距: 3575 m; 子波: 38 Hz, 零相位雷克子波。在采集完单炮记录后, 采用波动方程正演模拟进行克希霍夫叠前时间偏移成像(PSTM), 从而形成正演模拟地震剖面。为了更为直观分析砂体所对应的地震波场特征, 将 PSTM 成像的地震剖面转换到深度域, 与储层地质模型叠合显示(见图 2b)。图 2b 结果表明, 当 C<sub>7</sub> 和 C<sub>5-a</sub> 之间发育一套 C<sub>5-c</sub> 砂岩时, 在 C<sub>7</sub> 与 C<sub>5-a</sub> 之间的反射波振幅有增强趋势。随着 C<sub>5-c</sub> 砂岩的厚度增大, 反射波振幅明显增强, 当砂岩厚度大于 5 m 时, 能够形成明显的强振幅反射。由此可知研究区河道地震识别模式为: 在垂直于河道走向的地震剖面中, 河道具有“透镜状、亮点”强振幅的反射异常。

此外，沿层振幅属性的强弱变化也能够预测  $C_{5-c}$  河道砂岩发育程度，例如  $C_{5-c}$  沿层振幅属性中的强振幅条带，有可能是河道砂岩发育区域。

### 3.2 $C_5$ 段河道发育期次分析

为了明确有利的河道储层的发育区域，研究将地震沉积学分析技术和 RGB 混频分析技术相结合，利用基于 RGB 混频数据体的地层切片分析确定河道的期次和规模。

根据地震沉积学分析方法，沿着  $C_{5-c}$  底面 ( $T_1$  反射层位，见图 3) 拉平地震数据体，再进行 RGB 混频融合。根据实际地震资料的主频范围，结合钻井钻遇砂体的厚度，最终采用 26 hz、38 hz 和 42 hz 的三个分频数据体进行混频融合，并平行于  $T_1$  层，向上和向下每隔 2 ms 对  $C_5$  段混频数据体进行扫描。

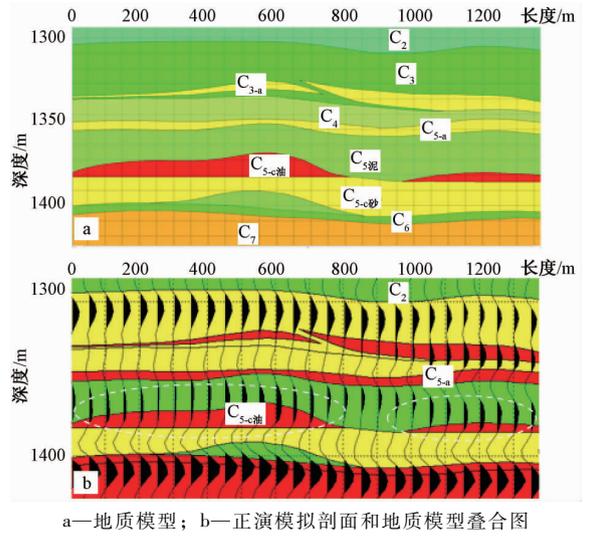


图 2 地震波场正演模拟图

Fig. 2 Forward modeling of the seismic wave field

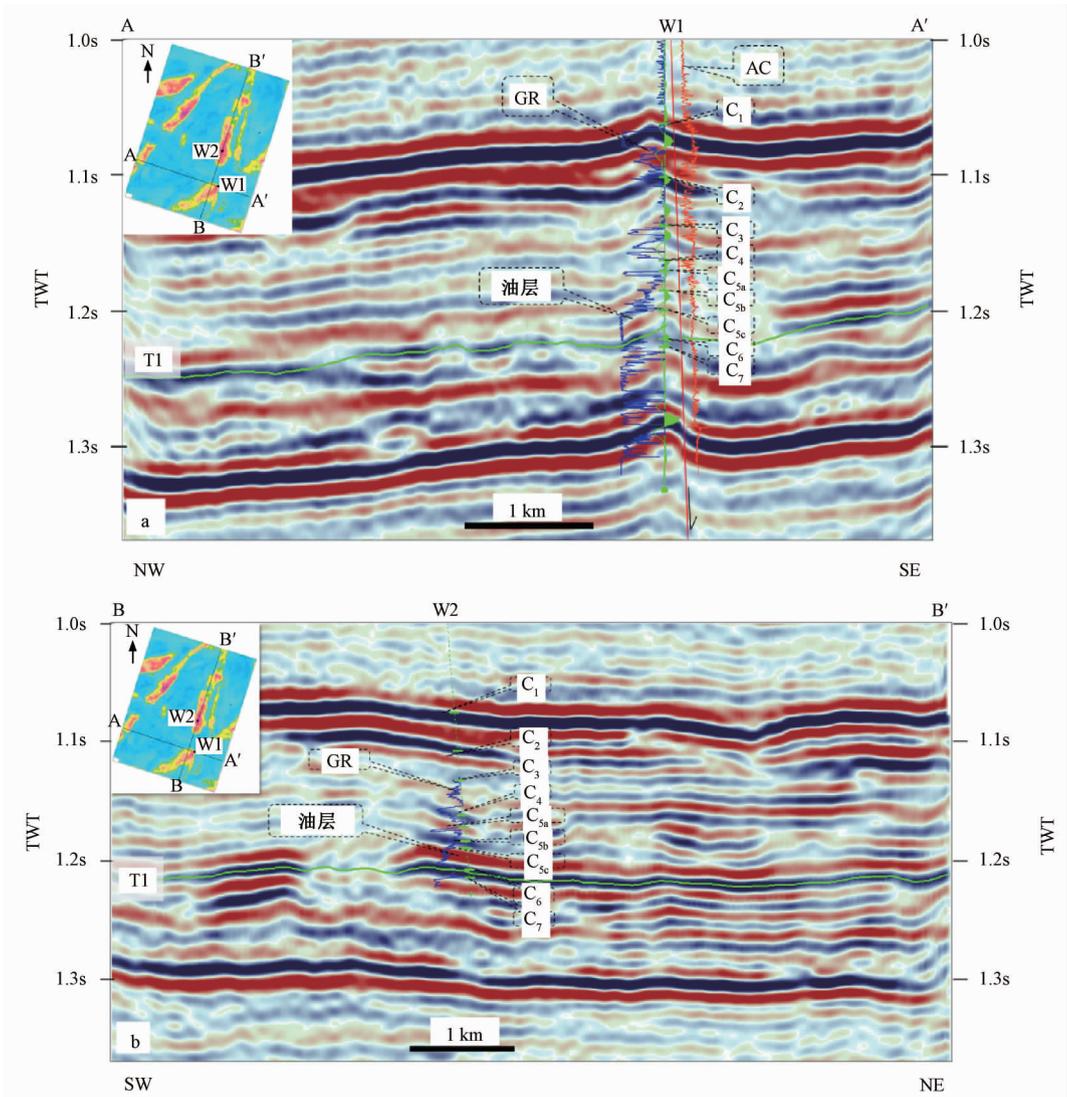


图 3 过 W1 和 W2 井地震剖面图

Fig. 3 Seismic sections cross well W1 and W2

地层切片扫描显示研究区 C<sub>5</sub> 段至少发育 3 期河道 (见图 4)。第一期河道 (图 4a 中黄色虚线所示), 主要发育在工区的北部, 河道走向以北北东和北东走向为主。随着沉积演化, 第一期的河道逐步向南推进。第二期河道发育在工区的东南部, 该河道走向北东向 (图 4b 中白色虚线所示), 与第一期河道角度相交。地层往浅层, 第一、二期河道仍发育, 但已经出现了近东西向河道 (见图 4c)。而在 C<sub>5</sub> 段的顶部, 近东西向和北东东向的河道取代了早期北东向和北北东向河道 (图 4d 中绿色虚线所示)。

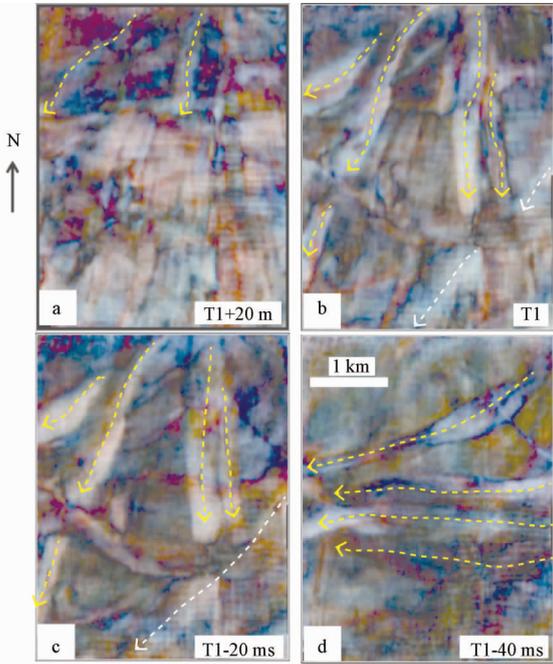


图 4 基于 RGB 混频数据体的地层切片图  
Fig. 4 Stratigraphic slices based on RGB mixing data volume

此外, 通过切片 (见图 4b、4c) 与三维地震解释交互分析可知, 晚期东西向河道下切较深, 切断了早期北东向河道, 从而造成早期河道分截的现象。

### 3.3 河道储层平面分布预测

地震多属性分析技术已被成功应用于河道砂岩储层预测中<sup>[7,21-22]</sup>。研究根据波场正演结果, 发现 C<sub>5-c</sub> 河道砂岩储层具有“亮点、强振幅”响应特征, 因此优选对于本区河道储层最为敏感的总绝对振幅属性研究河道的平面分布规律, 时窗选用 T<sub>1</sub> 层向上 20 ms、向下 10 ms。

通过振幅属性分析 (见图 5) 可知, 研究区 C<sub>5-c</sub> 发育 5 条河道, 即图中的河道①—⑤。河道①和②的走向呈北东向, 而河道③和④的走向呈北

北东向, 河道⑤呈北东向。结合前面的河道发育期次分析可知, 河道①至④主要是在 C<sub>5</sub> 段的早期形成, 而河道⑤形成于后期。

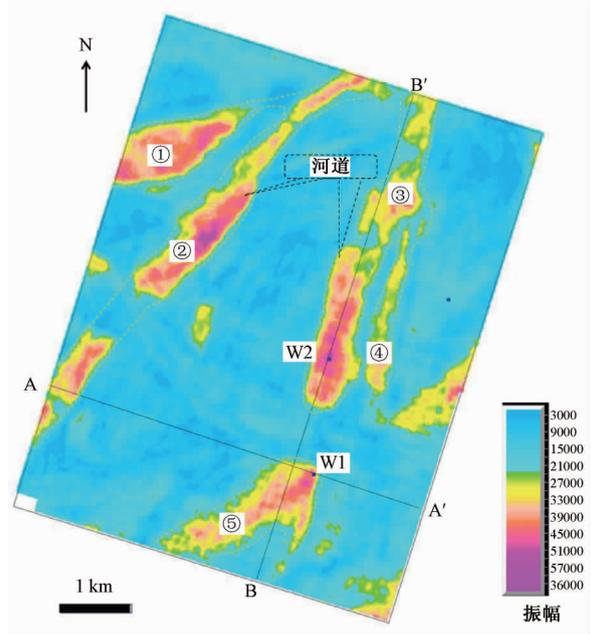


图 5 河道平面分布预测图

(T<sub>1</sub> 沿层向上 20 ms, 向下 10 ms 最大绝对振幅属性图)

Fig. 5 The prediction map for channel plane distribution  
(The maximum absolute amplitude diagram for T<sub>1</sub> along the top 20 ms and down 10 ms)

通过对图 5 中 3 种强振幅区域的长度和面积进行测量, 得到不同河道的长度和平面面积 (见表 2), 河道①、②和③的规模较大, 其中延伸最长是②号河道, 延伸 6.5 km, 面积最大, 为 2.74 km<sup>2</sup>; 延伸最短的是⑤号河道, 延伸 2.3 km, 面积为 1.91 km<sup>2</sup>; 河道的平均宽度在 322 ~ 830 m 之间, 最窄的④号河道仅仅宽 322 m, 面积也较小, 仅为 0.79 km<sup>2</sup>。

表 2 河道参数统计表

Table 2 The statistics parameters of channel sand

河道编号	河道宽度/m	延伸长度/m	面积/km <sup>2</sup>	走向
①	830	2783	1.31	NE
②	556	6509	2.74	NNE
③	628	4575	2.48	NNE
④	322	2633	0.79	NNE
⑤	543	2361	1.91	NE

### 3.4 C<sub>5-c</sub> 砂体孔隙度和厚度定量研究

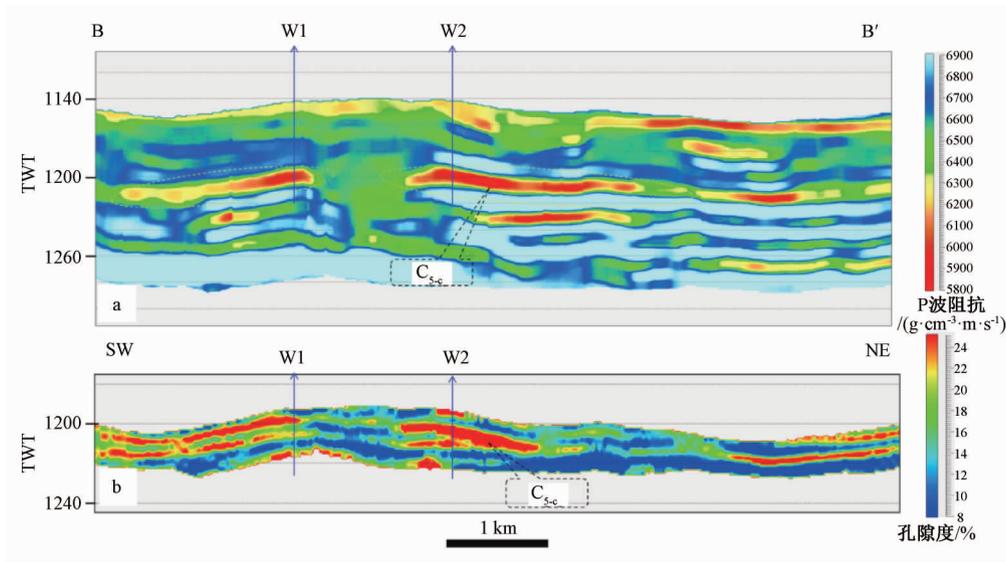
从 W1 井储层岩性分析研究可知 (见表 1), 砂岩与泥岩的波阻抗差异在不同层段表现不一致: 在 C<sub>5-c</sub> 段砂岩主要对应低阻抗特征, C<sub>6</sub> 泥岩阻抗相

对高；到下部  $C_7$  段砂岩阻抗有增大趋势，砂岩与泥岩阻抗接近。由此可见，纵波阻抗能够有效区分目的层  $C_{5-c}$  段的砂泥岩，波阻抗阈值为  $6420 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。砂岩 GR 小于等于 80 API，波阻抗小于  $6420 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；泥岩 GR 大于 80 API，波阻抗大于  $6420 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

研究采用约束系数脉冲反演得到高分辨率波阻抗数据体。图 6a 为过③号和⑤号砂体连井线反演剖面，图中黄色—红色区域表示低阻抗区域，是砂岩发育区，图中的绿色—蓝色区域，是相对阻抗较高的区域，是泥岩发育区。波阻抗反演结

果显示研究区内  $C_{5-c}$  砂体厚度最大 W1 井所在的⑤号砂体和 W2 井所在的③号砂体可能连通。

孔隙度预测是基于波阻抗数据体，通过分析波阻抗数据的概率密度分布函数、井数据的孔隙度概率密度函数以及反演空间变换规律的变差函数、波阻抗数据与孔隙度数据的关系，利用地震统计学反演，模拟得到高分辨率的孔隙度数据体（见图 6b）。图中暖色调区域是孔隙度较高的区域，冷色调是孔隙度较低的区域。在河道砂岩发育区域，孔隙度均比较高，孔隙度一般大于 16%。



a—波阻抗反演剖面；b—孔隙度反演剖面

图 6 波阻抗和孔隙度反演图（剖面位置见图 5）

Fig. 6 The inversion charts of impedance and porosity

沿着  $T_1$  层位向上开 20 ms 时窗，提取波阻抗反演数据体波阻抗阈值小于  $6420 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  的数据范围的砂岩样点数，利用声波时差测井曲线计算砂体厚度数据，最终得到  $C_{5-c}$  段砂岩厚度平面分布图（见图 7）。由图 7 可见，工区内砂体主要呈条带状展布，厚度横向变化快，砂岩厚度分布规律与前文预测的河道分布规律一致，主河道范围内砂岩厚度一般大于 3.05 m，砂体最大厚度约 35.05 m，位于 W2 井区位置，其结果与完钻的 W1 井（35.36 m）吻合，河道间以泥岩沉积为主。

### 4 勘探潜力分析

研究区具备较好的成藏条件，已有研究成果

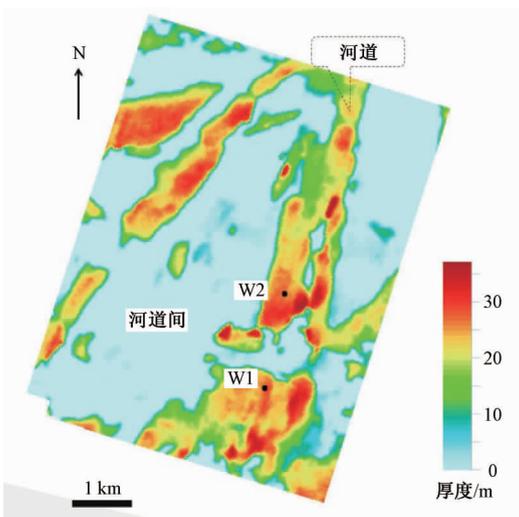


图 7 研究区  $C_{5-c}$  储层厚度预测图

Fig. 7 Prediction of  $C_{5-c}$  reservoir thickness in the study area

和区域调研均显示研究区的盖层较为发育<sup>[9]</sup>, W1 井钻探发现 C<sub>5c</sub> 段上覆 23.16 m 泥岩, 以及 C<sub>4</sub> 段发育的一套比较稳定泥岩均为较好盖层。侧向封堵条件在研究区也是满足的, 本区 C<sub>5</sub> 段处于三角洲前缘沉积环境, 河道间的泥岩可进行侧向封堵(见图 7)。而 C<sub>5</sub> 段河道砂岩来的油气运移通道<sup>[4]</sup>主要为基底卷入的高角度正断裂和 C<sub>7</sub> 段砂体。

因此解决研究区储层的横向均质性问题是勘探关键。研究区 Carbonera 组发育多期次、较大规模的河道, 河道砂岩储层可作为有利的油气储集体。在研究区 40 km<sup>2</sup> 范围内, C<sub>5</sub> 段至少发育三期河道, 河道的走向有北东、北北东和近东西向(见图 4), 河道的宽度 322~830 m (见表 2)、河道砂岩最厚可以达到 35.05 m (见图 7), ③号河道面积最大, 达到 2.48 km<sup>2</sup>。

油田作业者后期在③号河道部署 W2 井(见图 3b、图 7), 该井在 C<sub>5c</sub> 段钻遇砂岩 26.82 m, 砂岩段上部发现 11.58 m 的油层, 经测试, 该井日产油 376.5 吨/日, 综合含水 0.2%。该井的钻探成功, 充分证实该研究储层精细描述技术的有效性和成果的准确性, 同时也预示着其它的几条河道具有良好的勘探潜力。

## 5 结论

(1) 研究区 C<sub>5c</sub> 河道砂岩的典型地震响应特征和地震识别模式是: 在垂直于河道走向的地震剖面上呈现“下切形态、亮点反射异常”, 在沿河道走向的地震剖面上呈“连续强反射异常”, 在平面上呈“条带状展布”。

(2) 以波场正演模拟为指导、以基于 RGB 混频数据体的地层切片属性和地震振幅属性分析为关键、以储层反演为核心的河道砂岩逐级描述技术能够有效预测研究区河道砂岩的空间展布。研究区 40 km<sup>2</sup> 三维区内, Carbonera 组 C<sub>5</sub> 段至少发育 3 期河道, 其中 C<sub>5c</sub> 段发育 5 条河道, 河道的宽度 322~830 m、河道延伸长度 2.3~6.5 km、河道砂岩厚度 3.05~35.05 m, 5 条河道总面积 9.23 km<sup>2</sup>, 这些河道砂岩储层可以作为下步油气勘探的新目标。

## 参考文献/References

[1] Bayona G, Valencia A, Mora A, et al. Stratigraphy and

provenance of Miocene rocks in the distal Llanos foreland basin of Colombia [J]. *Geologia Colombiana*, 2008, 33: 23~46. (未找到本条文献信息, 请核对)

- [2] Cooper M A, Addison F T, Alvarez R, et al. Basin development and tectonic history of the Llanos Basin, Eastern Cordillera, and Middle Magdalena Valley, Colombia [J]. *AAPG Bulletin*, 1995, 79 (10): 1421~1443.
- [3] 刘亚明, 张春雷. 哥伦比亚油气地质与勘探 [J]. *石油实验地质*, 2011, 33 (3): 226~232.
- LIU Yaming, ZHANG Chunlei. *Petroleum geology and exploration in Colombia* [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2011, 33 (3): 226~232. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张金伟. 哥伦比亚 D 区块油藏类型及成藏控制因素 [J]. *石油天然气学报 (江汉石油学院学报)*, 2014, 36 (7): 22~26.
- ZHANG Jinwei. The reservoir type and main control factors on Hydrocarbon accumulation in Block D of Columbia [J]. *Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jiangnan Petroleum Institute)*, 2014, 36 (7): 22~26. (in Chinese with English abstract)
- [5] 胡俊峰, 冯方, 杨江峰, 等. Llanos 盆地 W 油田河道砂体识别与描述 [J]. *西南石油大学学报 (自然科学版)*, 2015, 37 (6): 55~63.
- HU Junfeng, FENG Fang, YANG Jiangfeng, et al. Identification of channel sand in W Oilfield of Llanos Basin [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 2015, 37 (6): 55~63. (in Chinese with English abstract)
- [6] Moncayo E, Tchegliakova N, Montes L. Pre-stack seismic inversion based on a genetic algorithm: A case from the Llanos Basin (Colombia) in the absence of well information [J]. *CT&F - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 2012, 4 (5): 5~20.
- [7] Bosch M, Morales D, Gomez Y, et al. Elastic seismic inversion and reservoir characterization in the Llanos Basin, Colombia [J]. *The Leading Edge*, 2014, 33 (7): 734~744.
- [8] 冯方, 傅恒, 宋亮, 等. 南美 Llanos 盆地中生代-新生代构造沉积演化及石油地质特征 [J]. *成都理工大学学报 (自然科学版)*, 2015, 42 (5): 521~529.
- FENG Fang, FU Heng, SONG Liang, et al. Mesozoic-Cenozoic tectonic and sedimentary evolution and petroleum geological features in Llanos Basin, South America [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2015, 42 (5): 521~529. (in Chinese with English abstract)
- [9] 冯方, 王晓杰, 胡俊峰, 等. 南美洲 Llanos 盆地 Dorotea 区块岩性-构造油藏勘探开发技术与实践 [J]. *中国石油勘探*, 2015, 20 (3): 79~88.
- FENG Fang, WANG Xiaojie, HU Junfeng, et al. Exploration and development technology for Lithologic-Structural reservoir in Dorotea Block of Llanos Basin in South America [J]. *China Petroleum Exploration*, 2015, 20 (3): 79~88. (in Chinese

- with English abstract)
- [10] 张金伟, 闫爱英, 柳文秀, 等. 亚诺斯盆地 Cabiona 区块油气成藏规律 [J]. 油气地质与采收率, 2012, 19 (4): 24 ~ 26, 30.  
ZHANG Jinwei, YAN Aiyong, LIU Wenxiu, et al. Study on reservoir occurrence rule in Cabiona block of Colombia [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2012, 19 (4): 24 ~ 26, 30. (in Chinese with English abstract)
- [11] 贺振华, 黄德济, 胡光岷. 复杂油气藏地震波场特征方法理论及应用 [M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1999.  
HE Zhenghua, HUANG Deji, HU Guangmin. Theory and application of seismic wave field characteristics of complex oil and gas reservoir [M]. Chengdu: Science and Technology Publishing House, 1999. (in Chinese)
- [12] 李雪英, 李东庆, 王博运, 等. 基于波动方程的薄互层正演模拟方法 [J]. 地球物理学进展, 2014, 29 (6): 2697 ~ 2701.  
LI Xueying, LI Dongqing, WANG Boyun, et al. The forward modeling method of thin interbedding based on wave equation [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29 (6): 2697 ~ 2701. (in Chinese with English abstract)
- [13] 尚帅. 地震信号高分辨率谱分解方法与应用 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.  
SHANG Shuai. High-resolution seismic spectral decomposition and its application [D]. Changchun: Jilin University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [14] Puryear C I, Castagna J P. Layer-thickness determination and stratigraphic interpretation using spectral inversion: theory and application [J]. Geophysics, 2008, 73 (2): 37 ~ 48.
- [15] Castano K P, Ojeda G, Montes L. Thin-layer detection using spectral inversion and a genetic algorithm [J]. Earth Sciences Research Journal, 2011, 15 (2): 121 ~ 128.
- [16] 唐湘蓉, 彭真明, 蔡涵鹏. 基于 Gabor 变换的时频分析在气层识别中的应用 [J]. 石油天然气学报, 2012, 34 (3): 65 ~ 70.  
TANG Xiangrong, PENG Zhenming, CAI Hanpeng. Application of Time-frequency analysis based on Gabor transform in gas reservoir identification [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34 (3): 65 ~ 70. (in Chinese with English abstract)
- [17] 靳涛. 基于 RGB 原理的地震多属性显示技术研究与应用 [D]. 济南: 山东大学, 2010.  
JIN Tao. Research and application on RGB theory based multiple seismic attributes display technique [D]. Jinan: Shandong University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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 (5): 355 ~ 358.  
CAO Jianhua. RGB color blending and its application in channel recognition [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2010, 33 (5): 355 ~ 358. (in Chinese with English abstract)
- [19] 郑连弟, 袁联生, 杨强, 等. Gabor 变换与三原色融合技术在碳酸盐岩缝洞储层识别中的应用 [J]. 物探化探计算技术, 2016, 38 (5): 631 ~ 636.  
ZHENG Liandi, YUAN Liansheng, YANG Qiang, et al. Application of Gabor transform and RGB tricolor in reservoir prediction of fracture-cavity carbonate reservoir [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 38 (5): 631 ~ 636. (in Chinese with English abstract)
- [20] Guerrero J G, Vargas C A, Montes L A. Reservoir characterization by multiattribute analysis: the orito field case [J]. Earth Sciences Research Journal, 2010, 14 (2): 173 ~ 180.
- [21] 史洪波. 松辽盆地榆东地区河道砂体地震地质特征及预测技术 [J]. 石油天然气学报 (江汉石油学院学报), 2014, 36 (11): 60 ~ 63.  
SHI Hongbo. Seismic geologic features and prediction technology of channel sand body in Yudong area of Songliao Basin [J]. Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jianghan Petroleum Institute), 2014, 36 (11): 60 ~ 63. (in Chinese with English abstract)
- [22] 姚逢昌, 甘利灯. 地震反演的应用与限制 [J]. 石油勘探与开发, 2000, 27 (2): 53 ~ 56.  
YAO Fengchang, GAN Lideng. Application and restriction of seismic inversion [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27 (2): 53 ~ 56. (in Chinese with English abstract)
- [23] Nie R, Yue J H, Deng S Q, et al. Wave impedance inversion in coalfield based on immune genetic algorithm [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2009, 1 (1): 929 ~ 935.
- [24] 郭朝斌, 杨小波, 陈红岳, 等. 约束稀疏脉冲反演在储层预测中的应用 [J]. 石油物探, 2006, 45 (4): 397 ~ 400.  
GUO Chaobin, YANG Xiaobo, CHEN Hongyue, et al. Constrained sparse pulse inversion research in north of Haitongji depression [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006, 45 (4): 397 ~ 400. (in Chinese with English abstract)
- [25] 杨培杰. 地质统计学反演 - 从两点到多点 [J]. 地球物理学进展, 2014, 29 (5): 2293 ~ 2300.  
Yang Peijie. Geostatistics inversion from two-point to multiple-point [J]. Progress in Geophysics, 2014, 29 (5): 2293 ~ 2300. (in Chinese with English abstract)
- [26] Berge T B, Aminzadeh F, De Groot P, et al. Seismic inversion successfully predicts reservoir, porosity, and gas content in Ibhuesi Field, Orange Basin, South Africa [J]. The Leading Edge, 2002, 21 (4): 338 ~ 348.