

基于水平井信息的辫状河岩相单元与砂体定量研究 ——以委内瑞拉奥里诺科重油带 MPE3 区块为例

黄文松¹, 陈和平¹, 李胜利², 万广峰³, 徐芳¹, 孟征¹, 刘畅²

[1. 中国石油 勘探开发研究院, 北京 100083; 2. 中国地质大学(北京) 能源学院, 北京 100083;

3. 中国石油 拉美(巴西)公司, 里约热内卢 22250-040]

摘要:采用直井信息进行砂体定量研究时,往往由于井间对比的不确定性,导致对砂体规模的认识存在较大的不确定性。水平井对储层砂体横向预测具有重要参考价值,这是常规直井难以达到的。因为水平井可以揭示砂体横向变化,从而为我们在砂体定量表征、岩相单元划分等量化地质研究方面提供帮助。针对研究区辫状河储层特点,结合直井岩心、直井与水平井的测井信息,首先确定出4类岩相单元,进行直井与水平井岩相单元划分;然后结合直井与水平井信息,进行砂体定量研究,确定了心滩和辫状河道砂体的形态及发育规模,进而建立了心滩长宽比、心滩与河道宽度比、夹层与心滩宽度比等定量关系;随后以水平井钻遇砂体信息为约束,进行储层地震波阻抗反演;最后结合砂体定量表征与波阻抗反演结果,进行岩相单元的预测。研究结果表明:基于水平井信息可以精细刻画储层内部岩相分布特征,提高储层砂体定量研究与内部非均质性描述的精度;水平井段信息增加了参与地震储层反演的样点数量,从而减小了井间储层预测的不确定性,可以明显提高储层内部地震反演精度和可靠性,并可以提供更为可靠的储层岩相模型。

关键词:辫状河道与心滩;岩相单元;储层岩相模型;砂体定量研究;水平井

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Quantification of braided-river lithofacies units and sandbody based on horizontal well data: A case of MPE3 block in Orinoco heavy-oil zone, Venezuela

Huang Wensong¹, Chen Heping¹, Li Shengli², Wan Guangfeng³, Xu Fang¹, Meng Zheng¹, Liu Chang²

[1. Research Institute of Petroleum Exploration & Development, PetroChina, Beijing 100083, China;

2. School of Energy Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

3. CNODC Brasil Petróleo e Gás Ltda., Rio de Janeiro 22250-040, Brazil]

Abstract: When quantifying sandbody with vertical well data, the volume of sandbody often cannot be defined accurately due to the uncertainty of the interwell correlation. Horizontal well data are of significant referential value for lateral prediction of reservoir sandbody, which is difficult to be achieved by conventional vertical well data. Horizontal wells can reveal lateral variation of sandbodies, so as to assist us in quantitative characterization of sandbodies and quantitative classification of lithofacies units. This study is composed of 4 steps. Firstly, it identified 4 types of lithofacies units according to the braided-river characteristics in the study area, coring data in vertical wells and well logging data in vertical and horizontal wells, with a view to classify lithofacies units in vertical and horizontal wells. Secondly, a quantitative research on the sandbodies was carried out with horizontal and vertical well data, and thus confirmed the configuration and scale of channel bars and braided channel sandbodies. Besides, the length-width ratio of channel bars, the width ratio of channel bar to channel and that of interbed to channel bar were well established. Subsequently, the seismic wave impedance inversion on braided-river reservoirs was carried out under the constraint of information from sandbodies encountered by horizontal well. Finally, prediction of lithofacies units was done based on the quantitative characterization of sandbodies and the results of wave impedance inversion. Results show that: (1) the horizontal well data can be used to

收稿日期:2017-03-13;修订日期:2018-02-20。

第一作者简介:黄文松(1973—),男,高级工程师,沉积储层。E-mail:hwshws6@petrochina.com.cn。

通讯作者简介:李胜利(1971—),男,副教授,矿产普查与勘探。E-mail:Slili@cugb.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(41572080);国家科技重大专项(2016ZX05031-001)。

finely characterize lithofacies distribution within reservoirs and improve the accuracy of sandbody quantification and description of internal reservoir heterogeneity; (2) the information from the laterals can increase the number of sample points in seismic inversion, thereby lower the uncertainty of interwell reservoir prediction, greatly improve the accuracy and reliability of internal reservoir seismic inversion, and increase the reliability of the reservoir lithofacies model.

Key words: braided channel and channel bar, lithofacies unit, reservoir lithofacies model, sandbody quantification, horizontal well

随着地质人员对地下储层认识程度的不断提高以及油田开发后期方案调整的需要,储层定量化研究日益重要。储层定量研究即定量表征地质体内部基本要素(如砂体、隔夹层等)的发育规模、形态特征、以及接触关系^[1-4],主要研究方法主要包括现代沉积调研、野外露头解剖、油田密井网研究、三维地震水平切片和沉积过程的物理模拟以及地质建模等^[5-8]。野外露头解剖是最直观的储层定量研究方法,比如:英国 BP 公司在美国奥克拉荷马 Gypsy 剖面 and 英国约克逊剖面进行的研究^[9];国内贾爱林等针对大同和滦平的野外露头考察,建立了扇三角洲和辫状河原型地质知识库^[10-12]。地下储层的定量研究,特别是储集砂体的定量研究,显然难度更大。但地下储层砂体定量研究对油气勘探开发更为重要,因为它不仅可以预测无井控区域的砂体发育规模和展布情况,还可以建立砂体几何参数的经验公式,进一步应用于地质建模之中^[13-16]。

近年来,随着水平井技术逐渐成为提高油气田单井产量及开发效益最有效的技术手段^[17],利用水平井信息开展地下储层砂体定量研究逐渐为人们所重视。仅采用直井信息进行砂体定量研究,往往限于井间对比的不确定性,导致对砂体规模的认识存在较大的不确定性;而大量的水平井信息,由于可以揭示砂体横向变化,从而可以弥补这一缺陷。同时,水平井段信息也可以为砂体定量表征、岩相单元划分等定量化地质研究提供有益借鉴。

研究区的辫状河流相储层由多期河道相互叠置组成,河道相变快、储层非均质性强,如心滩顶部披覆的不连续薄层状的泥质、粉砂质夹层等,是单一河道间的沉积转换界面^[18-23]。这些夹层对于水平井的油层钻遇率和整个砂体的规模以及垂直或水平渗透率影响很大,然而这些夹层长度和宽度从数十米到几百米、甚至数米的数量级内其变化较大;而厚度从数十厘米到 1~2 m,也变化较大,因此常规数百米井距的直井开发井网很难控制其变化规律与规模,仅能用沉积相分析做出定性预测。研究区的水平井的水平井段总体垂直于物源水流方向,利用水平井水平段长、能够横穿多套砂体的特点,对水平段轨迹进行校正,通过对测井曲线

的岩性或岩相分析,能够对砂体和夹层做出相对可靠的定量分析^[24]。

1 研究区概况与地质背景

奥里诺科重油带位于南美洲典型前陆盆地——东委内瑞拉盆地的南部^[25-26],是目前世界上储量最大的重油带^[27-28]。这个重油带被断裂带分为 4 个油区自西向东分别为 Boyacá, Junin, Ayacucho 和 Carabobo 四个油区^[29-30],本次研究区为委内瑞拉奥里诺科重油带 Carabobo 区 MPE3 油田,新近系早中新统为本区的主要含油层段^[31]。储层为砂质辫状河沉积,主要物源方向为南西-北东向^[32],储层物性较好,为高孔特高渗储层,平均孔隙度 30.2%,平均渗透率 $5\,000 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。油区采用丛式水平井平行布井方式,水平段为南北向,目前区内拥有直井 25 口,372 口水平井,水平井间隔 300~600 m,水平段长度达到 800~1\,200 m(图 1)。

2 岩相单元划分

目的层由 3 个油层组成,从上至下命名为 O-11, O-12 和 O-13,其中 O-12 可进一步分为 O-12s 和 O-12i 两个砂层,主要发育辫状河道、心滩和泛滥平原 3 种沉积微相^[29]。根据岩心观察,岩性以粗-中砂岩为主,砾岩和细砂岩其次,局部发育泥岩。岩石颜色以灰绿色、灰色、灰黄色为主,偶见褐色、灰黑色泥岩。共可归纳出以下 8 种岩相类型:①块状厚层含砾粗砂岩相;②块状厚层粗砂岩相;③块状中粗砂岩相;④层状含泥砾中粗砂岩相;⑤平行层理细-粉砂岩相;⑥含泥质条带粉细砂岩相;⑦含粉砂岩条带泥岩相;⑧暗灰色泥岩相(图 2)。其中,粗、中砂岩主要发育块状层理,单层厚度普遍较大;细-粉砂岩主要发育水平层理,厚度较薄;泥岩主要发育水平层理和块状层理。

2.1 岩相单元的划分

利用反映储层物性特征的泥质含量、孔隙度、渗透率资料,可将研究区岩相单元划分为 4 类(表 1)。I 类代表高孔、高渗含砾或粗砂岩,主要由①、②类岩相

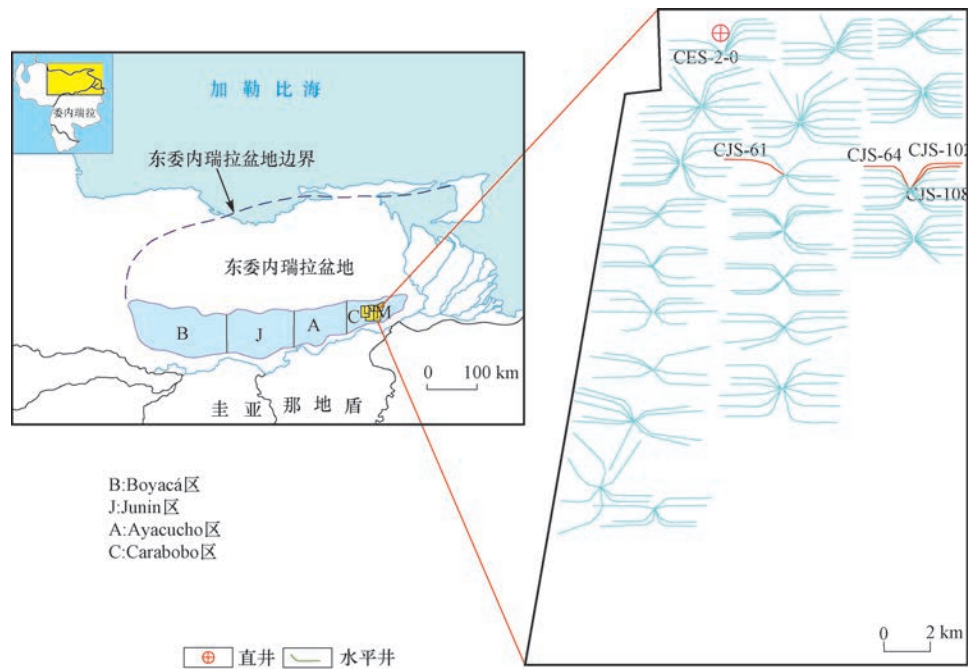


图 1 MPE3 油田位置与井位分布

Fig. 1 Location of MPE3 oilfield and wells

(红色标注的井为后文图 3、图 4、图 6、图 9 及图 10 中涉及的直井与水平井。)

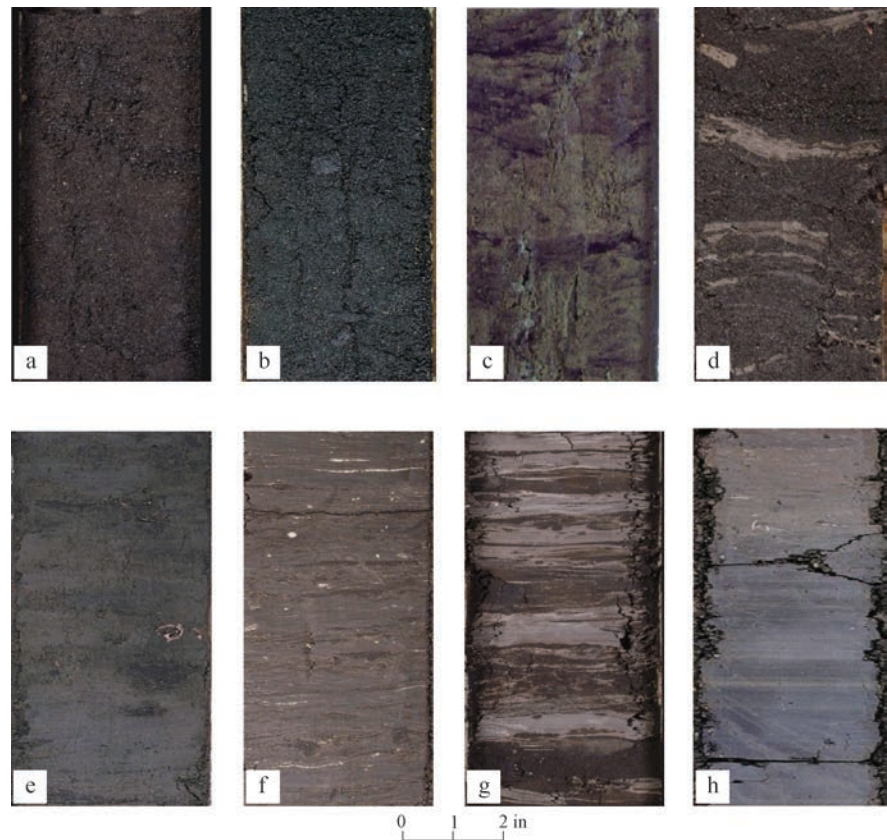


图 2 取心井 CES-2-0 主要岩相类型岩心照片

Fig. 2 Core pictures of main lithofacies in Well CES-2-0

a. 状块厚层含砾粗砂岩相(埋深 3261'2"~3261'9"); b. 块状厚层粗砂岩相(埋深 3260'1"~3260'8"); c. 块状中粗砂岩相(埋深 3253'0"~3253'7"); d. 层状含泥砾中粗砂岩相(埋深 3168'4"~3168'11"); e. 平行层理细-粉砂岩相(埋深 3162'4"~3162'11"); f. 含泥质条带粉细砂岩相(埋深 3152'3"~3152'10"); g. 含粉砂岩条带泥岩相(埋深 3341'5"~3341'12"); h. 暗灰色泥岩相(埋深 3147'1"~3147'8") (注: '表示英尺, "表示英寸)

表 1 岩相单元划分的物性标准

Table 1 Physical properties for lithofacies partitioning

岩相单元	孔隙度/%	渗透率/($10^{-3} \mu\text{m}^2$)	泥质含量/%
I 类	>30	>5 000	<8
II 类	28~30	1 000~5 000	8~12
III 类	25~28	100~1 000	12~26
IV 类	≤25	≤100	26~52

组成; II 类代表中孔、中渗的中粗砂岩,主要由③、④类岩相组成; III 类代表中低孔、低渗的细粉砂岩,主要由⑤、⑥类岩相组成; IV 类代表渗流屏障,主要为泥岩和粉砂岩,由⑦、⑧类岩相组成。

岩相单元的分布与沉积微相具有一定的关系,同

一个沉积微相中不同区域的岩相单元可能不同(图 3)。I 类岩相主要分布于心滩中,还有少数位于河道下部; II 类岩相主要分布于河道上部,部分分布于心滩和河道间; III 类岩相主要分布于辫状河道边部和河道间,少数位于心滩中; IV 类岩相主要泛滥平原、心滩内部的落淤沉积及河道边部。

2.2 水平井岩相单元分析

以往的研究中更多利用直井对岩相的纵向变化进行描述,而利用水平井资料可以更精细地划分和描述岩相的横向分布和变化规律,特别是同一个微相中岩相单元的横向变化,这是以往利用直井难以实现的。

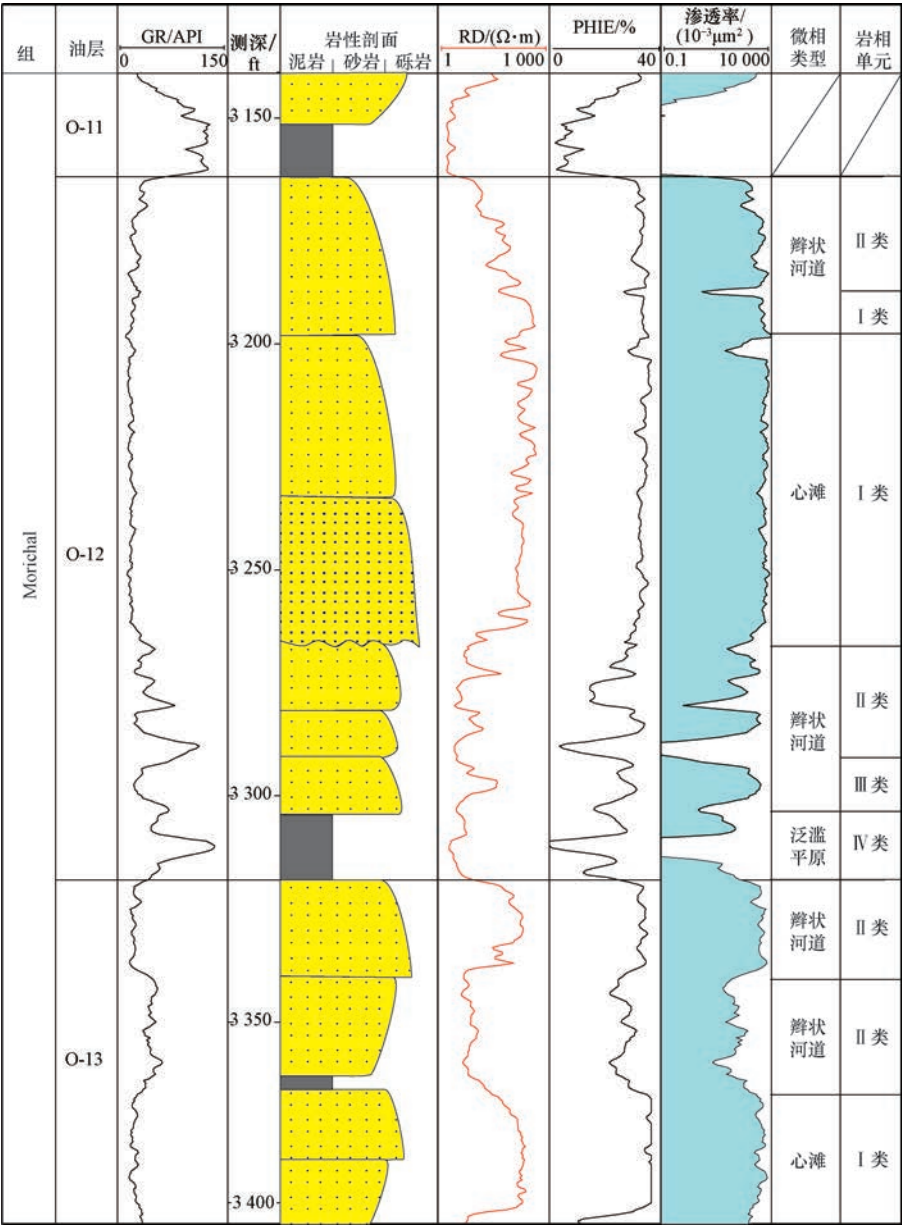


图 3 岩相单元与沉积微相(CES-2-0 井)

Fig. 3 Lithofacies units and sedimentary microfacies in Well CES-2-0

水平井的测井解释成果可以对岩相的横向变化做出更准确的刻画。横向上砂体内部岩相的变化非常频繁(图 4),这也真实地反映了辫状河沉积过程中水道的经常变迁所带来的沉积复杂性。

3 储层成因砂体规模定量研究

利用水平井横穿砂体的特点,可以确定不同成因

砂体的宽度;利用多水平井平行布井的特点,也可以确定砂体的长度;利用钻穿目的层的直井段,可以确定砂体的厚度;结合水平井与直井,通过多井对比和平面组合最终可以确定研究区地下砂体形态及长宽比等定量信息。

3.1 水平井穿越砂体形式

工区内水平井水平段横穿河道砂体的形式,大致

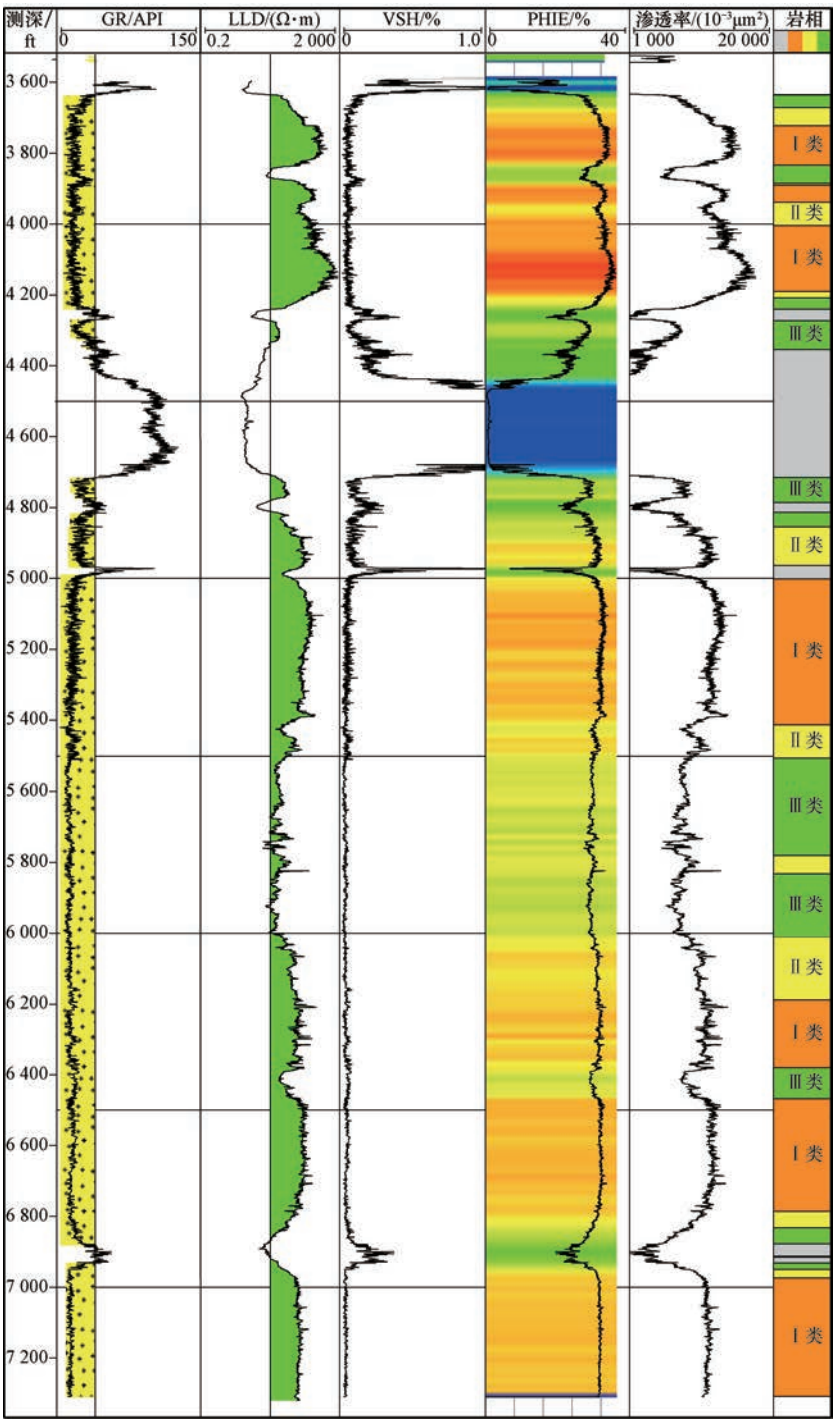


图 4 水平井岩相单元划分(CJS-102 井)
Fig. 4 Lithofacies partitioning of horizontal Well CJS-102

可以分为以下3种情况:直穿型、上穿型和下穿型(图5)。直穿型表现为两种形式:一种为没有穿过单砂体,为无效数据(图5a);另一种穿过单砂体,属于有效数据(图5b)。上穿型也表现为两种:一种没有经过或很少钻进目的层位单砂体,为无效数据(图5c);另外一种上下跳跃的幅度比较大,但终端从单砂体穿过,属于需要轨迹校正的有效数据(图5d)。下穿型的两种形式:一种直接下穿至其他层位的单砂体,为无效数据(图5e);另外一种下穿单砂体,但终端横穿目的砂体,也属于需要轨迹校正的有效数据(图5f)。

在选择有效水平井数据的基础上,将水平段轨迹先沿着砂体平面方向投影(图6a),之后再沿垂直于河道方向的投影(图6b),最终将水平段数据转化为能描述河道沉积特征的有效数据(图6c),可以对砂体边界

和规模以及砂体内部夹层做出客观定量的分析。

3.2 水平井刻画单期砂体规模

本区河道砂体为向上变细的正旋回,自然伽马曲线多表现锯齿箱型或钟型。心滩自然伽马曲线表现为箱型或者齿化箱型,砂岩单层厚度从几米到十几米,垂向相互叠加。研究区实际生产井有4套水平井井网,分别生产O-11, O-12s, O-12i 和 O-13 油层的油气,各层段井网中的水平井段只穿越相应的层位(图7a)。

在结合水平井段研究心滩砂体及河道平面展布情况时,通过对水平段 GR 曲线的观察,可以发现,水平段的 GR 曲线多为弱齿化箱形,曲线较平稳,某些部分曲线值较高,针对这种异常的曲线变化,总结出了平面上砂体的可能分布情况(图7b),反映了水平井段穿过河道砂体时,其河道砂体的侧积作用及其之间的泥质夹层部分会出现 GR 曲线持续增大的情况,而在穿过心滩内夹层及河道与心滩的边界位置时同会出现 GR 值增大的情况。

通过对4套水平井网特点及典型穿越砂体模式的总结,我们可以对工区内的目标层位平面砂体的展布情况进行分析。本文以O-11油层为例,分析了工区某小块区域中心滩及河道砂体的展布情况。由于该时期地层较稳定,且水平井井距较小,可先根据同一区域内的O-11井网的水平井,分析其穿过的O-11校直

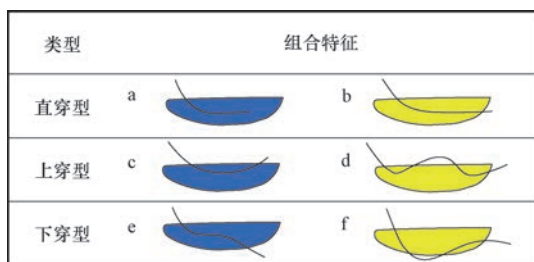


图5 水平井穿越河道砂体的模式示意图
Fig.5 Diagram showing sandbodies penetrated by a horizontal well

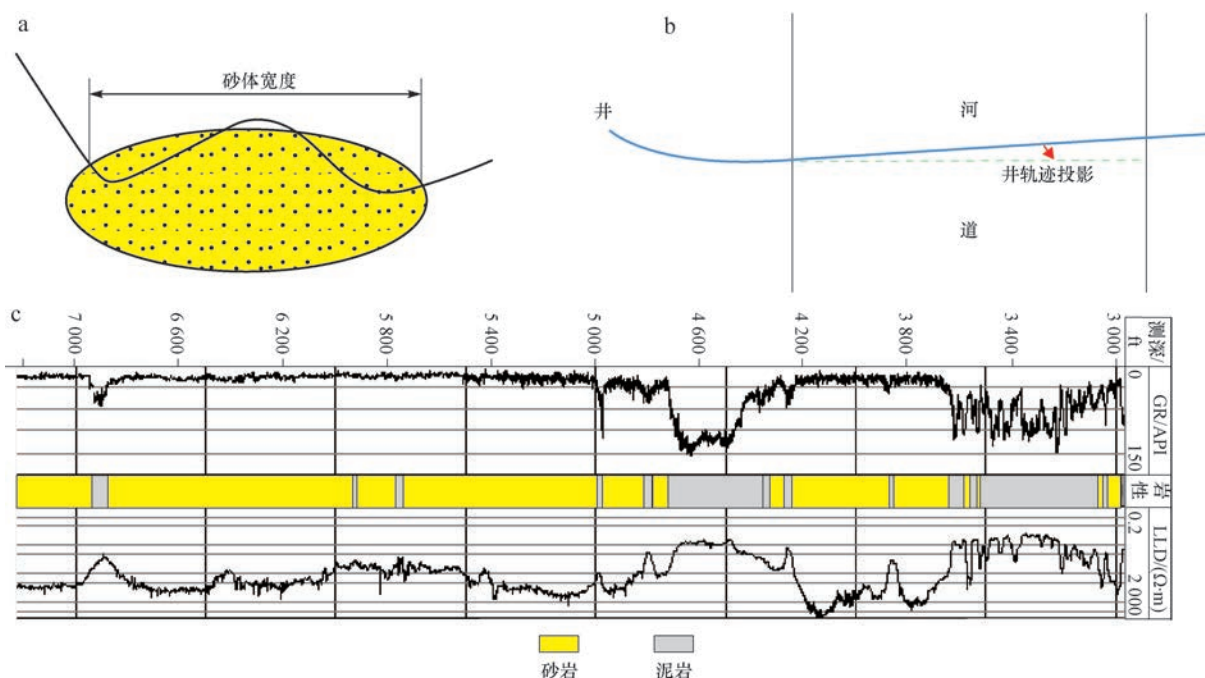


图6 水平井测井曲线校正(CJS-102井)

Fig.6 Horizontal well logging correction for Well CJS-102

a. 水平井轨迹与砂体关系示意图; b. 水平井轨迹及其在垂直河道方向的投影示意图; c. 水平井测井曲线校正后砂体解释结果

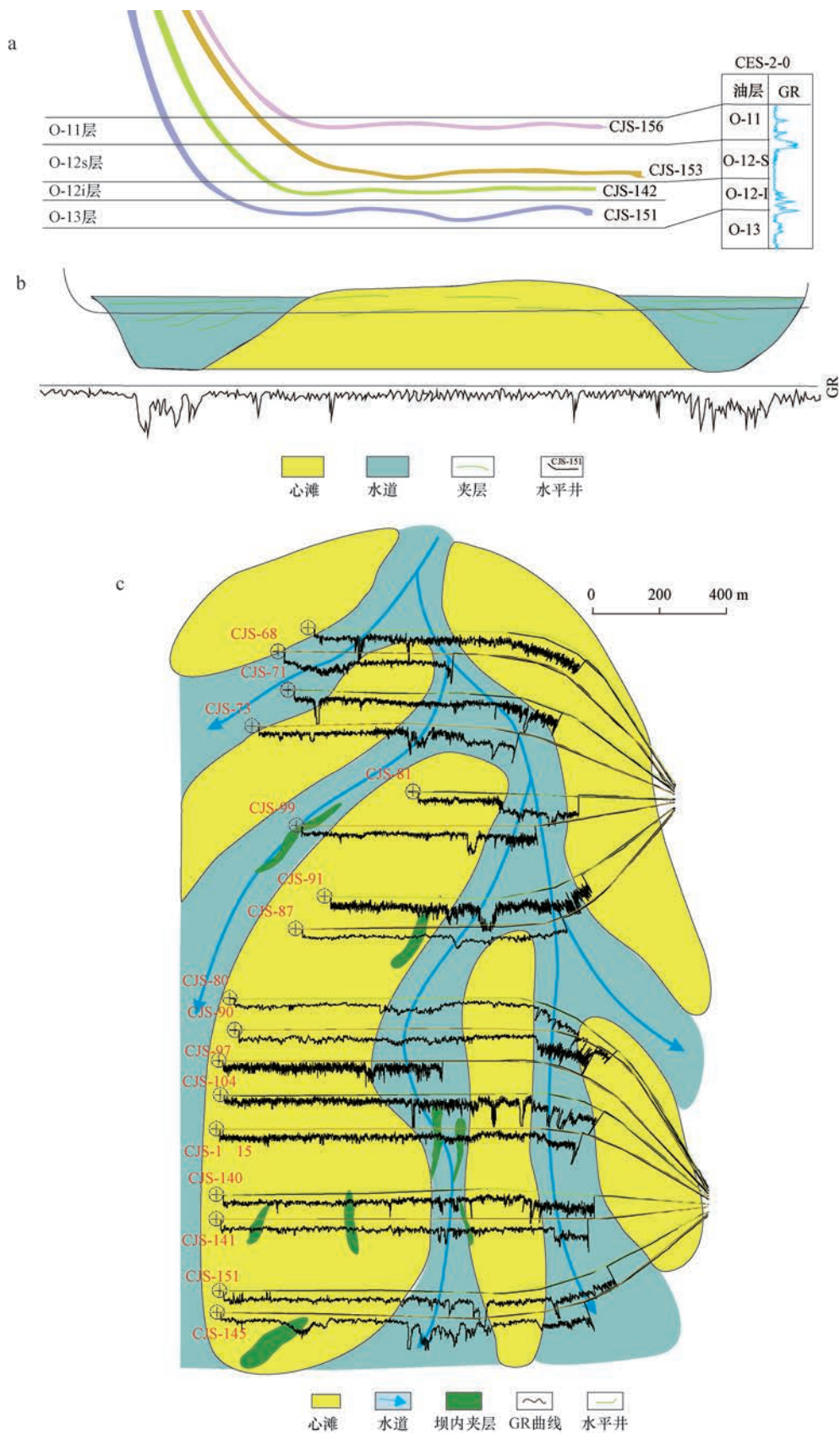


图 7 水平井刻画心滩及河道的平面展布示意图

Fig. 7 Sketch maps of channel bars channels and based on horizontal well data

a. 水平井开发层系示意图; b. 水平井钻遇河道、砂坝及夹层示意图; c. 水平井钻遇并确定砂体规模示意图

之后的测井段曲线特征,分析其在该层(O-11)的沉积微相,如图7a所示的CJS-153,CJS-142,CJS-151 3口井在O-11校直段可以反映这3口井在O-11的沉积微相;再根据水平井段远端的直井或斜井所穿过O-11油层的校直之后的测井曲线特征,确定O-11远端的沉积微相,再结合水平井穿过河道与心滩的模式(图7b)就可以大致确定心滩砂体及河道的规模与展布情况。

通过大量相互平行的水平井数据的对比分析,在单砂体级别实现了对河道、心滩的地下平面分布形态的刻画,并实现了对不同微相单砂体和内部夹层的规模特征的描述(图7c)。

经过对研究区所有井进行对比统计结果发现,本区辫状河道单期砂体宽度集中分布在400~1 000 m,平均宽度为640 m,单期河道充填砂体的平均厚度为2.7 m,大多在2.0~4.0 m;单期心滩砂体平均宽度为1 030 m,大多在600~1 200 m,心滩平均长度为2 010 m,大多介于1 500~2 500 m,心滩砂体较厚,平均厚度为5.9 m,大多心滩砂体厚度在5.0~7.0 m;夹层厚度多在1 m范围之内,但横向规模变化很大,总体在数十米内分布较多,横向宽度大于100 m的比较少见,而这正是辫状河砂体典型“砂包泥”特征的体现。

3.3 砂体定量表征

利用本区水平井资料,改进Kelly(2006)和孙天建(2014)等的经验公式^[20-21],建立了本区单一心滩宽度与其长度(图8)、单河道宽度、泥岩夹层宽度之间的相关关系式(1)一式(3)。

$$l_b = 6.97 W_b^{0.8597} \quad R^2 = 0.923 \quad (1)$$

$$W_e = 0.294 W_b^{1.0136} \quad R^2 = 0.845 \quad (2)$$

$$W_d = 0.51 W_b^{0.7523} \quad R^2 = 0.820 \quad (3)$$

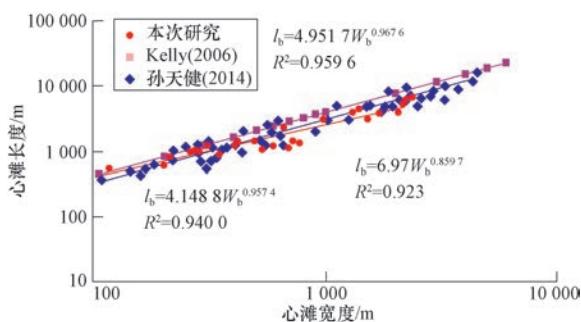


图8 心滩宽度(W_b)与心滩长度(l_b)拟合关系图

Fig.8 Correlation between width(W_b) and length(l_b) of channel bars

式中: l_b 为心滩长度,m; W_b 为心滩宽度,m; W_e 为河道宽度,m; W_d 为泥岩夹层宽度,m。

4 岩相单元预测

岩相是比沉积微相更小一级别的单元,基于直井与水平井信息融合,结合如前所述的砂体长宽比、宽度比等信息,采用地质建模的方法可以模拟岩相的分布。当然仅靠井信息仍然不够,因此在岩相模拟时加入地震储层反演预测结果将使模拟结果更符合地下真实。因此,本次本次岩相模拟分两个步骤:一是水平井信息参与地震储层反演;二是结合直井水平井的岩相划分结果。再融合水平井信息的地震储层反演结果,最终形成岩相模拟模型,实现了对水平井信息的深度挖掘。

4.1 水平井参与地震反演

将水平井段信息应用于地震反演,由于800~1 200 m长的水平段极大地提高了参与反演的储层样点数量,减小了井间储层预测的不确定性,可以明显提高储层内部地震反演精度和可靠性,为储层非均质特征描述和内部夹层特征研究提供了可靠的资料基础。水平井参与反演后,克服了直井在储层段数据量少和分布局限的缺点,反演结果在平面上描述砂体规模和形态的同时,对储层横向变化特征描述的精度明显得到提高(图9)。

4.2 利用水平井预测岩相单元分布

在单井(水平井与直井)岩相单元划分、砂体定量分析结果以及地震反演属性体的约束下,采用序贯指

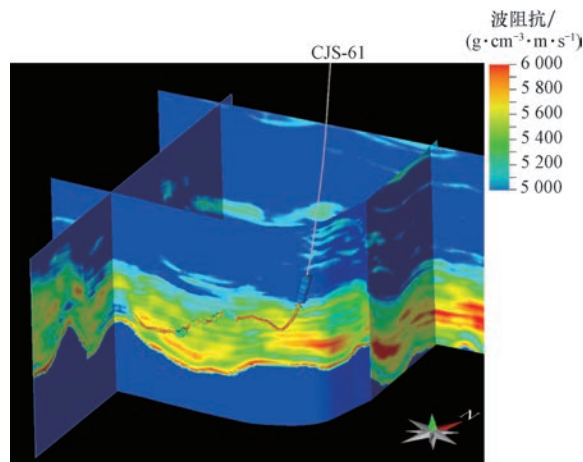


图9 水平井参与地震储层波阻抗反演

Fig.9 Well-tied seismic wave impedance inversion

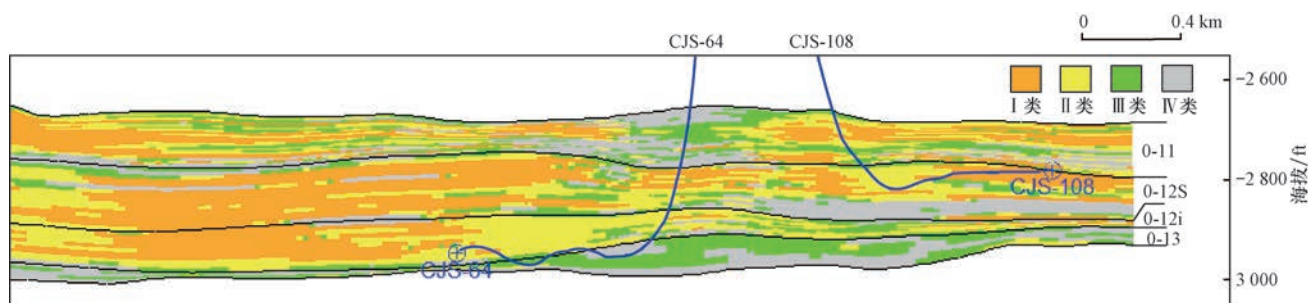


图10 基于水平井的岩相单元分布预测

Fig. 10 Lithofacies unit distribution prediction based on horizontal well data

示模拟的方法,采用储层地质建模 Petrel 软件进行储层内部的岩相横向分布预测(图10)。将水平井信息引入储层地质建模(尤其是岩相单元分布预测)中,借助水平井砂体横向变化信息,可以克服仅利用直井资料、三维地震资料等常规油藏描述手段不能精细刻画储层横向非均质性的难题,进而有效提高井间储层砂体的认识程度。一方面水平井岩相单元划分结果可以作为硬数据提供岩相预测的约束条件,而且提供了储层横向岩相单元变化的基础数据;另一方面水平井信息参与地震反演成果提高了横向预测可靠程度;同时利用水平井得到的砂体横向变化规模(长度、宽度、厚度信息)也可以提供岩相建模的重要约束信息。岩相单元预测结果表明:储层内部岩相的纵向分布规律细致而富于变化,更能反映真实的沉积环境,这是仅利用直井模拟难以达到的。

5 结论

1) 研究区辫状河储层可识别出8种岩相,结合孔、渗数据,进一步可归纳出4类岩相单元;在直井沉积微相划分基础上,利用水平井可以更好地反映砂体横向变化的特点,进行岩相单元划分,可为储层砂体规模与储层预测提供更多数据信息。

2) 针对不同井网水平井钻遇不同层段砂体的实际情况,直井与水平井相结合,可以确定辫状河沉积微相(即河道或心滩坝)的横向规模,也即建立长宽比及宽度比相关关系,达到定量表征储层砂体的目的,并为地震储层预测与地质建模提供约束信息。

3) 将水平井信息引入储层地质建模中进行岩相单元预测,可以克服利用直井资料、三维地震资料等常规油藏描述手段不能精细刻画储层横向非均质性的难题,有效提高井间储层砂体的认识程度。

参 考 文 献

[1] 熊琦华,纪发华. 地质统计学在油藏描述中的应用[J]. 中国石

油大学学报:自然科学版,1995,19(1):115-120.

Xiong Qihua, Ji Fahua. Application of geostatistics to reservoir description [J]. Journal of the University of Petroleum, China, 1995, 19(1):115-120.

[2] 贾爱林,郭建林,何东博. 精细油藏描述技术与发展方向[J]. 石油勘探与开发,2007,34(6):691-694.

Jia Ailin, Guo Jianlin, He Dongbo. Perspective of development in detailed reservoir description [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(6):691-694.

[3] 尹太举,张昌民,樊中海,等. 双河油田井下地质知识库的建立[J]. 石油勘探与开发,1997,24(6):95-98,120.

Ying Taiju, Zhang Changming, Fan Zhonghai, et al. Founding subsurface geological data bank for shuanghe oil field [J]. Petroleum Exploration and Development, 1997, 24(6):95-98, 120.

[4] 陈程,孙义梅,贾爱林. 扇三角洲前缘地质知识库的建立及应用[J]. 石油学报,2006,27(2):53-57.

Chen Cheng, Sun Yimei, Jia Ailin. Development and application of geological knowledge database for fair delta front in the dense spacing area [J]. Acta Petrolei Sinica, 2006, 27(2):53-57.

[5] Cabello P, Falivene O, López-Blanco M, et al. An outcrop-based comparison of facies modelling strategies in fan-delta reservoir analogues from the Eocene Sant Llorenç del Munt fan-delta (NE Spain) [J]. Petroleum Geoscience, 2011, 17(1):65-90.

[6] Colomera L, Mountney N P, Howell J A, et al. A test of analog-based tools for quantitative prediction of large-scale fluvial architecture [J]. AAPG Bulletin, 2016, 100(2):237-267.

[7] Colomera L, Felletti F, Mountney N P, et al. A database approach for constraining stochastic simulations of the sedimentary heterogeneity of fluvial reservoirs [J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(11):2143-2166.

[8] 郭燕华,袁士义,宋新民. 提高辫状河流相砂体储集层骨架模型精度的新方法[J]. 石油勘探与开发,2004,(S1):110-112.

Guo Yanhua, Yuan Shiyi, Song Xinmin. A new method for improving precision of the framework model of braid fluvial sandstone in dense drilling zone [J]. Petroleum Exploration and Development, 2004, (S1):110-112.

[9] 贾爱林,穆龙新,陈亮,等. 扇三角洲储层露头精细研究方法[J]. 石油学报,2000,21(4):105-108,7.

Jia Ailin, Mu Longxin, Chen Liang, et al. Approach for Detailed Study of Reservoir Outcrop [J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(4):105-108, 7.

[10] Miall A D. Fluvial sedimentology VI; Smith N D, Rogers (Eds.) J; International Association of Sedimentologists Special Publication 28,

- 1999, 478 pages [J]. *Sedimentary Geology*, 2000, 137(3): 241–243.
- [11] Martinus A W, Hegner J, Kaas I, et al. Sedimentology and depositional model for the Early Miocene Oficina Formation in the Petrocedeno Field (Orinoco heavy-oil belt, Venezuela) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 35(1): 354–380.
- [12] 袁新涛, 吴向红, 张新征, 等. 苏丹 Fula 油田辫状河储层内夹层沉积成因及井间预测 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2013, 37(1): 8–12+34.
- Yuan Xintao, Wu Xianghong, Zhang Xinzheng, et al. Sedimentary origin and interwell prediction of interbeds in braided river reservoir, Fula Oilfield in Sudan [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2013, 37(1): 8–12+34.
- [13] Choi K, Jackson M D, Hampson G J, et al. Predicting the impact of sedimentological heterogeneity on gas-oil and water-oil displacements; fluvio-deltaic Pereriv Suite Reservoir, Azeri-Chirag-Gunashli Oilfield, South Caspian Basin [J]. *Petroleum Geoscience*, 2011, 17(2): 143–163.
- [14] Deveugle P E K, Jackson M D, Hampson G J, et al. Characterization of stratigraphic architecture and its impact on fluid flow in a fluvial-dominated deltaic reservoir analog: Upper Cretaceous Ferron Sandstone Member, Utah [J]. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(5): 693–727.
- [15] Farrell M, Abreu V. Reservoir connectivity in fluvial-deltaic depositional environments; South Timbalier 26 field study (abs.) [C] // AAPG International Conference and Exhibition, Perth: AAPG, 2006.
- [16] Hirsche K, Boerner S, Kalkomey C, et al. Avoiding pitfalls in geostatistical reservoir characterization: A survival guide [J]. *The Leading Edge*, 1998, 17(4): 493–504.
- [17] 王国勇. 苏里格气田水平井整体开发技术优势与条件制约——以苏53区块为例 [J]. *特种油气藏*, 2012, 19(1): 62–65+138.
- Wang Guoyong. Technical advantages and limitations of integrated development of Sulige gas field with horizontal wells: a case study with Block Su53 [J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2012, 19(1): 62–65+138.
- [18] Pranter M J, Vargas M F, Davis T L. Characterization and 3D reservoir modelling of fluvial sandstones of the Williams Fork Formation, Rulison field, Piceance basin, Colorado, USA [J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2008, 5(2): 158.
- [19] Seifert D, Jensen J L. Object and pixel-based reservoir modeling of a braided fluvial reservoir [J]. *Mathematical Geology*, 2000, 32(5): 581–603.
- [20] Gibling M R. Width and thickness of fluvial channel bodies and valley fills in the geological record: a literature compilation and classification [J]. *Journal of sedimentary Research*, 2006, 76(5): 731–770.
- [21] Kelly S. Scaling and hierarchy in braided rivers and their deposits: Examples and implications for reservoir modeling [M]. Oxford, UK: Blackwell Publishing, 2006: 75–106.
- [22] 杨丽莎, 陈彬滔, 李顺利, 等. 基于成因类型的砂质辫状河泥岩分布模式——以山西大同侏罗系砂质辫状河露头为例 [J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(1): 93–98.
- Yang Lisha, Chen Bintao, Li Shunli, et al. Pattern of Genesis-based mudstone distribution for sandy braided river: A case study of sandy braided-river outcrop, Datong, Shanxi Province, China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(1): 93–98.
- [23] 孙天建, 穆龙新, 赵国良. 砂质辫状河储集层隔夹层类型及其表征方法——以苏丹穆格莱特盆地 Hegli 油田为例 [J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(1): 112–120.
- Sun Tianjian, Mu Longxin, Zhao Guoliang. Classification and characterization of barrier-intercalation in sandy braided river reservoirs: Taking Hegli Oilfield of Muglad Basin in Sudan as an example [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(1): 112–120.
- [24] 李林, 滕鑫森, 盛利民, 等. 水平井地质导向中储集层边界识别与测距 [J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(1): 108–111.
- Li Lin, Teng Xinmiao, Sheng Limin, et al. Identification and ranging of reservoir boundary in horizontal well geo-steering [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(1): 108–111.
- [25] 程小岛, 李江海, 高危言. 南美板块北部边界作用对其含油气盆地的影响 [J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(1): 112–119.
- Cheng Xiaodao, Li Jianghai, and Gao Weiyan. Impact of the northern South America Plate boundary evolution upon petroliferous basins [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(1): 112–119.
- [26] 刘亚明, 谢寅符, 马中振, 等. Orinoco 重油带重油成藏特征 [J]. *石油与天然气地质*, 2013, 34(3): 315–322.
- Liu Yaming, Xie Yinfu, Ma Zhongzhen, et al. Heavy oil accumulation characteristics of the Orinoco heavy oil belt [J]. *Oil & Gas Geology*, 2013, 34(3): 315–322.
- [27] 佚名. 委内瑞拉奥里诺科重油带的石油地质特征及资源潜力 [J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2006, 21(5): 67.
- Petroleum geological characteristics and resource potential of the Orinoco Heavy-oil Belt, Venezuela [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2006, 21(5): 67.
- [28] 邹才能, 张光亚, 陶士振, 等. 全球油气勘探领域地质特征、重大发现及非常规石油地质 [J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(2): 129–145.
- Zou Caineng, Zhang Guangya, Tao Shizhen, et al. Geological features, major discoveries and unconventional petroleum geology in the global petroleum exploration [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(2): 129–145.
- [29] Soto D, Man P, Escalona A. Miocene-to-recent structure and basinal architecture along the central range strike-slip fault zone eastern offshore Trinidad [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(1): 212–234.
- [30] Garoiacaro E, Escalona A, Man P. Structural controls on Quaternary deepwater sedimentation, mud diapirism, and hydrocarbon distribution within the actively evolving Columbus foreland basin, eastern offshore Trinidad [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(1): 149–176.
- [31] 陈浩, 陈和平, 黄文松, 等. 委内瑞拉奥里诺科重油带 Carabobo 油区 M 区块 Morichal 段地层沉积演化特征 [J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2016, 31(1): 45–52.
- Chen Hao, Chen Heping, Huang Wensong, et al. Sedimentary evolution characteristics of Morichal Member in M Block of Carabobo Area of Orinoco Heavy-oil Belt, Venezuela [J]. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 2016, 31(1): 45–52.
- [32] 陈浩, 陈和平, 黄文松, 等. 委内瑞拉奥里诺科重油带沉积特征 [J]. *地质科技情报*, 2016, (4): 103–110.
- Chen Hao, Chen Heping, Huang Wensong, et al. Sedimentary Characteristics of the Orinoco Heavy-oil Belt, Venezuela [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2016, (4): 103–110.

(编辑 张亚雄)