

文章编号:0253-9985(2012)06-0909-05

致密砂岩地震预测在水平井轨迹设计中的应用

许杰,董宁,朱成宏,刘俊洲,陈天胜

(中国石化石油勘探开发研究院,北京,100083)

摘要:鄂尔多斯盆地大牛地气田二叠系下石盒子组一段(盒一段)属于典型的辫状河道沉积,砂岩较厚,气层分布存在着较强的非均质性,气藏的水平井开发难度较大。为了提高致密砂岩气藏储层“甜点”钻遇成功率,在高分辨率层序地层和沉积体系分析的基础上,明确了盒一段辫状河道沉积相展布规律及沉积特征,提出了综合应用三维地震资料解释、地震波形分析、AVO含气检测及地质统计学反演等地震预测成果设计水平井轨迹的技术方法。其中,AVO负梯度异常和地质统计学反演等地球物理预测技术发挥了特别重要的作用,为大牛地致密砂岩气藏水平井开发提供了技术支持。层序地层理论和有效的地球物理预测方法结合是提高致密砂岩气藏储层“甜点”钻遇成功率的理想途径。

关键词:地震波形;AVO负梯度;地质统计学反演;层序地层学;水平井;大牛地气田;鄂尔多斯盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Application of seismic data to the design of horizontal well trajectory in tight sandstone gas reservoirs

Xu Jie, Dong Ning, Zhu Chenghong, Liu Junzhou and Chen Tiansheng

(Exploration & Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China)

Abstract: The 1st member of Permian Xiashihezi Formation (He-1) in Daniudi gas field, Ordos Basin, is braided channel deposits with large thickness. As heterogeneity of the gas layer distribution is strong, development of the gas reservoirs with horizontal wells is difficult. In order to increase the success rate of drilling “sweet spot” in this tight sandstone layer, we studied in detail the sedimentary facies and characteristics of the braided channel deposits in He-1 based on analyses of high resolution sequence stratigraphy and sedimentary system, and presented methods to integrate various seismic data into design of horizontal well trajectory, such as 3D seismic interpretation, waveform analysis, AVO gas detection and geo-statistical inversion. Among these seismic data, negative AVO gradient and geo-statistics inversion are the most important and can provide strong technical support to the development of the tight sand gas reservoirs with horizontal wells in Daniudi gas field. The integration of sequence stratigraphy theory with geophysical prediction methods is an effective way to improve the success rate of “sweet spot” drilling in tight gas sandstone reservoirs.

Key words: seismic waveform, negative AVO gradient, geo-statistic inversion, sequence stratigraphy, horizontal well, Daniudi gas field, Ordos Basin

鄂尔多斯盆地北部伊陕斜坡带大牛地地区二叠系下石盒子组一段(盒一段)为辫状河道沉积,砂岩发育较厚(单层厚度10~28 m)。岩性主要为岩屑砂岩,少量中-粗粒岩屑石英砂岩,储层孔喉为大孔微细喉,平均孔隙半径为39 μm ,平均喉

道半径为0.63 μm ,平均孔隙度为10.31%,平均渗透率为 $0.76 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为低孔、低渗致密砂岩储层。钻井结果表明,盒一段致密砂岩储层及其含气性在纵横向具有很强的非均质性^[1-2]。

在实际开发中,为了降低勘探风险,提高储量

收稿日期:2011-09-05;修订日期:2012-09-25。

第一作者简介:许杰(1967—),男,高级工程师,矿产普产与勘探。

的动用程度,开展了水平井轨迹设计的技术方法研究,对盒一段致密砂岩气藏的开发具有重要的意义^[3-6]。

1 层序地层划分与沉积相特征

盒一段沉积早期,整个盆地抬升,相对下伏山西组沉积期整体可容纳空间降低,来自北部的碎屑沉积物供给量加大,大牛地地区辫状河道异常发育,以粗粒的心滩沉积叠置为特征,只在长期旋回洪泛面附近有细粒泥质沉积。

根据沉积层序边界特征和沉积旋回组合关系,在对地震、钻井、测井、露头及岩心等资料进行综合研究的基础上,应用高分辨率层序地层学原理^[7-12],将盒一段划分为1个长期基准面旋回层序(图1),由3个中期旋回(MSC1, MSC2, MSC3)叠加组成,具有上升半旋回自下而上由粗变细和由浅变深的粒度变化,厚度明显大于反向变化的下降半旋回,代表缓慢水进和加速水退的地层旋回过程。岩性以浅灰色砂质岩为主夹少量棕褐色、灰色和灰绿色泥岩,沉积序列下部普遍含砾。其上升半旋回主要由厚的、连续叠置的河道砂体(包括滞留河床、心滩砂体微相的细砾岩、含砾粗砂岩、中-粗粒砂岩和粉-细砂岩)组成,向上泥质组分增多和加深变细的水进序列。下降半旋回由薄的洪泛沉积,粉-细砂岩,粉砂岩、泥岩的韵律交替,组成向上加粗增厚的水退序列。

该时期辫状河特别发育,大牛地气田盒一段底界面为大型冲刷面,辫状河道叠置的主体砂层厚度大于30 m,宽度从6 km至20 km,第一个中期旋回层序(MSC1)是盒一段河流体系最为发育的沉积,河道主体在大牛地地区从北至南贯穿,确立了整个盒一段沉积相分布格局(图2)。从盒一段砂岩厚度和沉积相图分析,辫状河道砂岩最发育的区域为工区中部D8井区的南北条带。

2 地震反射界面地质意义

根据地震合成记录, T_9^d 地震反射波标定在下石盒子组盒一段底界面附近,振幅横向变化较大,同相轴不连续,有些地方出现空白反射和杂乱反射(图3)。通过岩石物理和正演模拟分析,影响 T_9^d

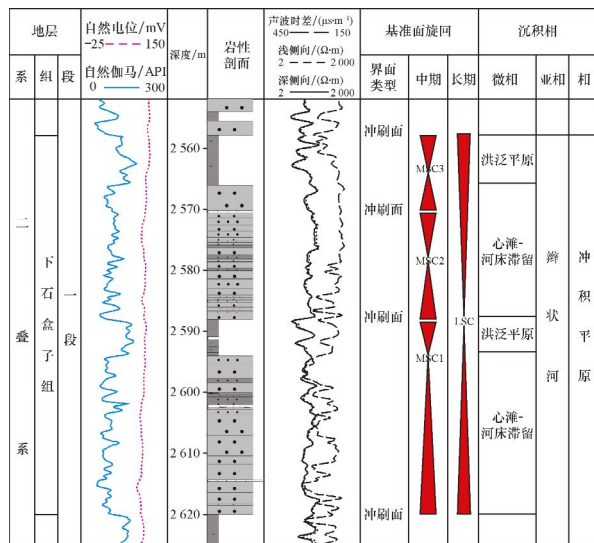


图1 大牛地气田D8井盒一段层序地层及沉积相
Fig. 1 Sequence stratigraphy and sedimentary facies of He-1 member in Well D8 in Daniudi gas field

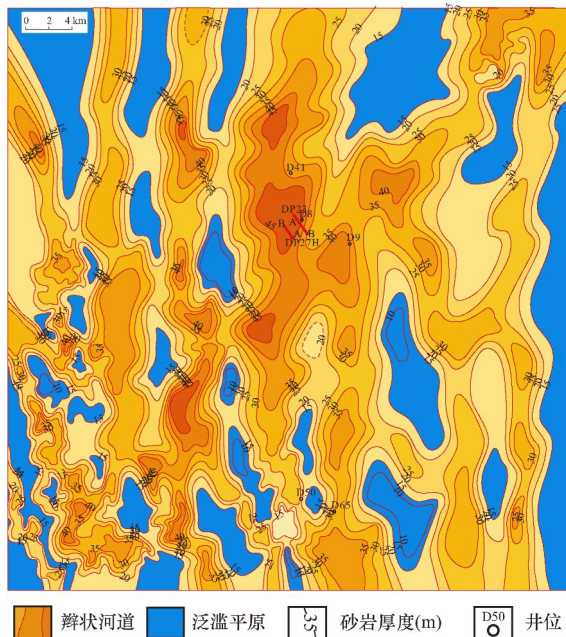


图2 大牛地气田盒一段沉积相
Fig. 2 Sedimentary facies of He-1 member in Daniudi gas field

地震波振幅和相位变化的主要因素为盒一段气层及下伏山西组煤层厚度和位置的变化。在区域上, T_9^d 地震反射波可近似作为具有等时地质意义的反射界面,即下石盒子组盒一段底界面(图3)。

文中重点探讨盒一段气层发育与否和气层厚度变化对地震反射波的影响,在盒一段气层发育

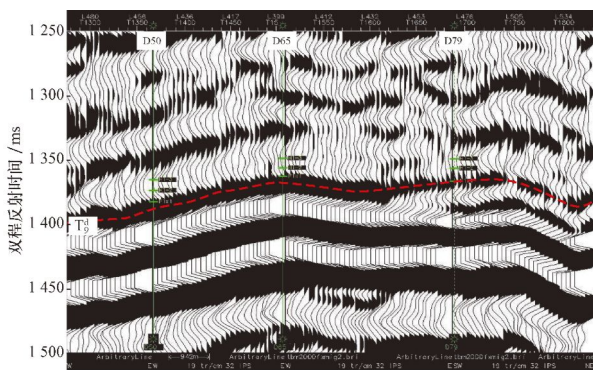
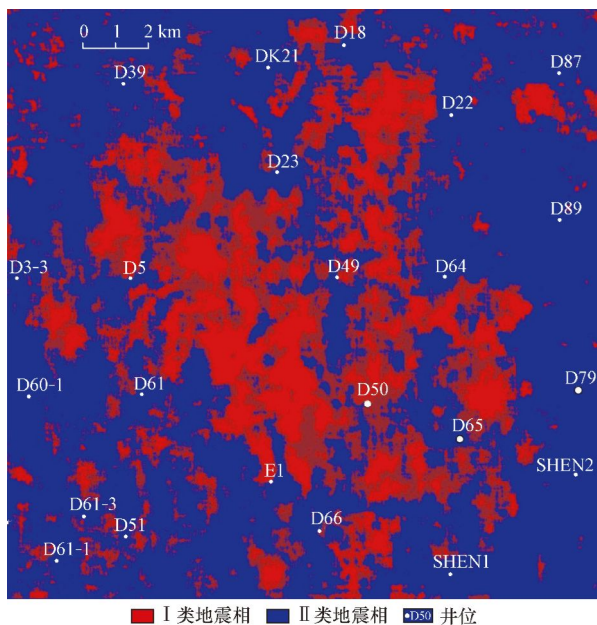


图3 大牛地气田盒一段地震反射特征

Fig. 3 Seismic reflectance signatures of He-1 member in Daniudi gas field

图4 大牛地气田 T_9^d 波形地震相Fig. 4 Seismic facies of the T_9^d waveform in Daniudi gas field

区,测井显示气层为高声波(大于 $235 \mu\text{s/m}$)、低电阻(小于 $100 \Omega \cdot \text{m}$)特征,气层为低波阻抗, T_9^d 地震波形特征表现为 T_9^d 之上为强波谷反射。大量实钻结果显示,高产气井(如 D50 井)在地震剖面 T_9^d 之上为强波谷特征,如 D50 井盒一段测试无阻流量 $3.4672 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,而 T_9^d 之上为杂乱或平直的弱波谷反射则气层不发育(图3)。这种强波谷反射波形能较准确地预测盒一段含气砂岩发育区。

根据 T_9^d 地震反射特征的这种地质含义,利用神经网络波形分类方法,将 T_9^d 波形分为两大类,一类波形为 T_9^d 之上宽缓强波谷反射(I类地震

相,图4中红色),另一类波形划分为 T_9^d 之上非强波谷反射(II类地震相,图4中蓝色),I类地震相代表高丰度含气砂岩,II类地震相代表干砂或泥岩。

对比盒一段无阻流量大于 $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的井,在 D50 井区为 I 类地震相, T_9^d 之上宽缓强波谷反射特征,高产气层与 I 类地震相具有较好的对应关系(图3,图4),气层分布与沉积相辫状河道展布一致,反映了 T_9^d 波形地震相对盒一段含气性预测的可靠性。

3 叠前 AVO 含气检测技术

在弹性参数分析(表1)的基础上,对盒一段单界面 AVO 响应进行正演模拟。正演结果表明(图5),泥岩-干砂岩的界面与泥岩-气砂岩、干砂-气砂岩的界面 AVO 特征是不同的,虽然都表现为负梯度(P)异常,但泥岩-干砂岩的截距(G)为正值。因此,盒一段高声波、低电阻气层属于 III 类 AVO,表现为负截距、负梯度异常特征(图6,绿

表1 大牛地气田盒一段弹性参数统计

Table 1 Elastic parameter statistics of He-1 member in Daniudi gas field

岩性	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^3$)	纵波速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}$)	横波速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}$)	泊松比
泥岩	2.60	4 584	255	0.28
干砂岩	2.62	4 651	280	0.22
气层	2.52	4 325	283	0.13

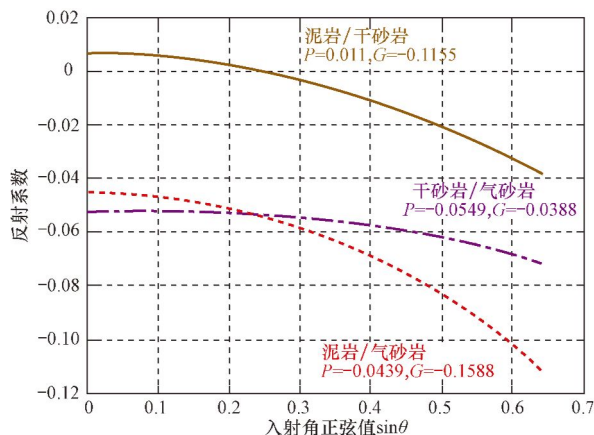


图5 大牛地气田盒一段单界面 AVO 正演结果

Fig. 5 Single interface AVO forward modeling of He-1 member in Daniudi gas field (P 为梯度, G 为截距。)

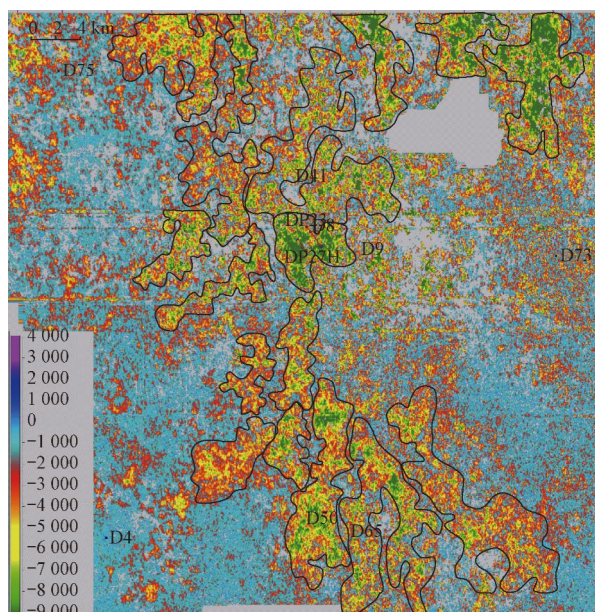


图6 大牛地气田盒一段 AVO 负截距、负梯度属性

Fig. 6 Negative intercept and negative gradient attributes of He-1 in Daniudi gas field

色和黄色代表气层发育)。这种 AVO 负截距负梯度异常预测的气层分布与沉积相辫状河道展布(图2)一致,尤其在 D8 井区南北辫状河道厚砂岩发育区有很好的对应关系,表现在主辫状河道上厚砂层中局部的“甜点”。

4 岩性地质统计学反演

针对岩性的地质统计学反演技术在大牛地致密砂岩气藏地震储层预测中已经成为常规目标处

理的一项关键技术,注重综合层序地层研究与地震解释成果建立精细地质模型^[3],以约束稀疏脉冲反演的波阻抗数据体为软趋势,进行岩性指示曲线的随机模拟,得到高分辨率的可分离砂岩、泥岩和煤层的岩性指示曲线三维数据体。该方法有效地综合利用了地质、测井和三维地震数据,岩性反演结果满足:①在井点处与测井数据反映的岩性一致;②在井间符合地震数据和已知岩性参数的地质统计学特征。

将地质统计学反演得到的岩性数据体和孔隙度数据体由时间域转化为深度域,在深度域进行地质子体雕刻,得到目的层盒一段砂岩厚度和孔隙度空间展布,计算出该地质子体的顶底构造图、砂岩厚度和孔隙度平面图,结合 AVO 负梯度负截距属性,并参考地震波形特征,设计水平井轨迹^[7-14]。

利用上述方法技术,在 D8 井区部署了盒一段水平井 DP27H,该井水平段砂岩发育(图7a),孔隙度发育(图7b),AVO 负梯度异常(图7c), T_0^d 之上波形为强波谷特征(图7d)。该井实钻获得高产工业气流,测试无阻流量达到 $17.878 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,实现了大牛地致密砂岩气藏水平井先导试验的成功。

5 结论及认识

1) 高分辨率层序地层学理论的应用能较好地认清辫状河道沉积相的展布规律,沉积相决定

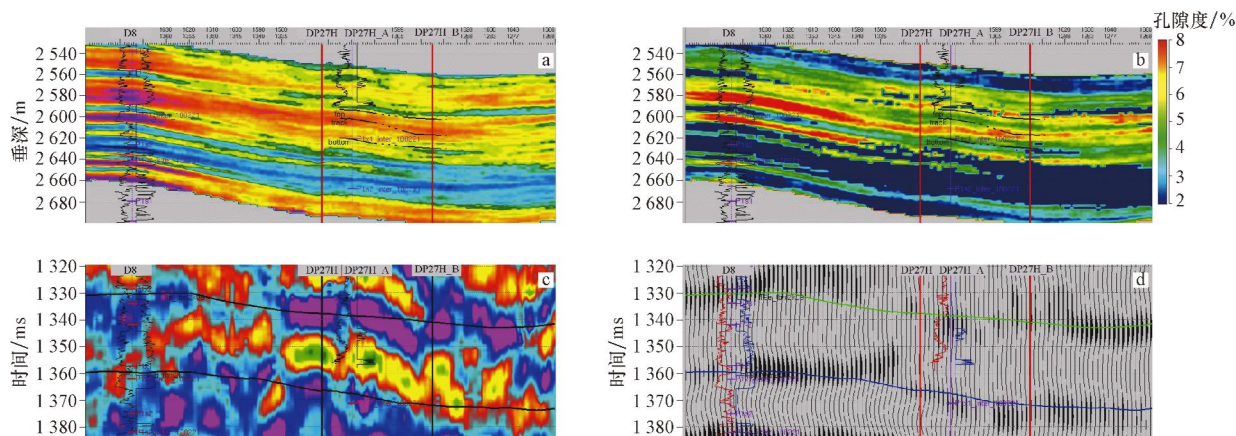


图7 大牛地气田盒一段水平井 DP27H 设计轨迹剖面

Fig. 7 Designed trajectory-of horizontal Well DP27H in He-1 member in Daniudi gas field

a. 岩性; b. 孔隙度; c. AVO 属性; d. 地震反射

了地层岩石类型和岩石组合,也决定了储层的发育和分布,沉积相是进行储层预测和描述的重要基础和依据。

2) 大牛地地区盒一段气层有效的预测技术方法是地震波形分析、AVO 含气检测和岩性、孔隙度地质统计学反演。

3) 致密砂岩气藏具有较强的非均质性,水平井的部署主要针对辫状河道砂岩中局部的“甜点”,预测气层的有效地球物理方法应在地震反射特征的地质认识和地震岩石物理分析基础上,针对性开展定性属性和定量反演研究。

参 考 文 献

- [1] 孙赞东,贾承造,李相方,等.非常规油气勘探与开发[M].北京:石油工业出版社,2011:407-593.
Sun Zandong, Jia Chengzao, Li Xiangfang, et al. Unconventional oil & gas exploration and development[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2011: 407-593.
- [2] 王代国.鄂尔多斯盆地塔巴庙地区二叠系下石盒子组盒1段砂岩成岩相与储集性能关系[J].地球科学与环境学报, 2006, 28(1): 32-36.
Wang Daiguo. Diagenetic facies and reservoir capability of p_{sl}¹ sandstone in Tabamiao area of Ordos Basin[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2006, 28(1): 32-36.
- [3] 孙玉平,陆家亮,巩玉政,等.我国气藏水平井技术应用综述[J].天然气技术与经济, 2011, 5(1): 24-27.
Sun Yuping, Lu Jialiang, Gong Yuzheng, et al. Review and suggestion on application of horizontal-well technology to gas reservoirs in China[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2011, 5(1): 24-27.
- [4] 刘迪仁,谢伟彪,殷秋丽.水平井不平整界面地层中感应测井模拟及影响分析[J].石油物探, 2012, 51(1): 86-90, 97.
Liu Diren, Xie Weibiao, Yin Qiuli. Simulation and analysis on induction logging of the formation with uneven boundary in horizontal well[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2012, 51(1): 86-90.
- [5] 史学东,吴修国,刘俊方.短半径水平井侧钻技术在沙特HRDH-128井中的应用[J].断块油气田, 2011, 18(5): 672-674.
Shi Xuedong, Wu Xiuguo, Liu Junfang. Application of short radius horizontal sidetracking technology in Well HRDH-128 of Saudi Arabia[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(5): 672-674.
- [6] 肖晖,吴小斌,何丹,等.鄂尔多斯盆地镇川地区长3低渗储层特征及其控制因素[J].断块油气田, 2011, 18(6): 701-704.
Xiao Hui, Wu Xiaobin, He Dan, et al. Characteristics and control factors of Chang 3 reservoir with low permeability in Zhenchuan Area, Ordos Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2011, 18(6): 701-704.
- [7] 彭才,张延充,梅燕,等.川中地区飞仙关组高能鲕滩储层地震预测[J].石油物探, 2010, 49(5): 504-508.
Peng Cai, Zhang Yanchong, Mei Yan, et al. Seismic prediction on high-energy oolitic-beach reservoir of Feixianguan Formation in central Sichuan Basin[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2010, 49(5): 504-508.
- [8] 刘建生,邓传伟.宁晋断裂陡坡带近岸水下扇体储层的地震预测[J].石油物探, 2010, 49(4): 380-383.
Liu Jiansheng, Deng Chuanwei. Seismic prediction of near-shore underwater fan reservoir in Ningjin fractured steep slope belt[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2010, 49(4): 380-383.
- [9] 李明,侯连华,邹才能,等.岩性地层油气藏地球物理勘探技术与应用[M].北京:石油工业出版社, 2005: 74-93.
Li Ming, Hou Lianhua, Zou Caineng, et al. Technology and application of geophysical exploration in lithostratigraphic reservoir[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 74-93.
- [10] 吴因业,邹才能,胡素云,等.全球前陆盆地层序沉积学新进展[J].石油与天然气地质, 2011, 32(4): 606-614.
Wu Yinye, Zou Caineng, Hu Suyun, et al. New advances in sedimentology and sequence stratigraphy of foreland basin[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 606-614.
- [11] 朱筱敏,董艳蕾,胡廷惠,等.精细层序地层格架与地震沉积学研究——以泌阳凹陷核桃园组为例[J].石油与天然气地质, 2011, 32(4): 615-624.
Zhu Xiaomin, Dong Yanlei, Hu Tinghui, et al. Seismic sedimentology study of fine sequence stratigraphic framework: a case study of the Hetaoyuan Formation in the Biyang Sag[J]. Oil & Gas Geology, 2011, 32(4): 615-624.
- [12] 秦雁群,邓宏文,侯秀林,等.海拉尔盆地乌尔逊凹陷北部高分辨率层序地层与储层预测[J].石油与天然气地质, 2011, 32(2): 214-221, 228.
Qin Yanqun, Deng Hongwen, Hou Xiulin, et al. High resolution sequence stratigraphy and reservoir prediction of northern Wuerxun Sag, the Hailar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2009, 30(2): 214-221, 228.
- [13] 许杰,董宁,宁俊瑞,等.鄂尔多斯盆地大牛地气田盒3段辫状河道沉积相预测[J].岩性油气藏, 2011, 23(2): 90-94.
Xu Jie, Dong Ning, Ning Junrui, et al. Sedimentary facies prediction of braided channel of the third member of Shihezi Formation in Daniudi gasfield, Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2011, 23(2): 90-94.
- [14] 李宗杰.塔河油田碳酸盐岩油藏水平井部署方法[J].石油物探, 2003, 42(4): 478-479.
Li Zongjie. Methods of disposing horizontal wells in carbonate reservoir in Tahe Oilfield[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2003, 42(4): 478-479.

(编辑 张亚雄)