

鄂尔多斯盆地南部彬长区块上石盒子组7段 储层识别与预测

刘玲¹, 王琳霖¹, 吴疆¹, 陈霞¹, 杨佳奇²

[1. 中国石化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]

摘要:鄂尔多斯盆地南部彬长区块上古生界上石盒子组7段(盒7段)是新的天然气勘探层系,但储层薄、岩性变化快、非均质性强、地震资料信噪比及分辨率低,储层预测及勘探目标优选难度大,严重制约了勘探进展。为了准确预测甜点储层,提高天然气勘探成功率,针对彬长区块盒7段储层特征,采用“结构、属性、反演”逐级预测技术:在砂岩地震反射结构及敏感弹性参数分析基础上,通过频率域反射结构神经网络波形聚类有效刻画了河道外形,贝叶斯随机反演准确预测了砂体厚度,含气性预测指明了甜点储层发育部位。研究表明:古地貌影响着砂体的平面展布,彬长区块上古生界盒7段主要在工区西部发育4条南西-北东向条带状展布的河道砂体,为勘探有利区,东部河道砂体孤立状零星分布。通过该方法指导部署的勘探开发目标实钻效果好,地震预测结果横向分辨率高,真实地反映了河道及河道砂体的变化特征,能有效解决研究区强非均质性薄储层致密砂岩甜点预测问题,对下一步的勘探开发具有重要的指导意义。

关键词:反射结构;频率域;反射结构;神经网络波形聚类;贝叶斯随机反演;含气性预测;储层识别;盒7段;彬长区块;鄂尔多斯盆地
中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Reservoir identification and prediction of He 7 Member in Binchang block, southern Ordos Basin

Liu Ling¹, Wang Linlin¹, Wu Jiang¹, Chen Xia¹, Yang Jiaqi²

[1. *Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 100083, China;*

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

Abstract: The 7th member of Upper Palaeozoic Shihezi Formation (He 7 Member), is a new favorable play for gas exploration in Binchang block, southern Ordos Basin. However, the reservoir prediction and selection of exploration targets therein have become quite hard given multiple factors including thin reservoir, rapid change of lithology, strong heterogeneity, and low signal-to-noise ratio and resolution. The exploration progress, thus, has been severely restricted. The study aims to improve the accuracy of sweet spot prediction and the success rate of natural gas exploration in the study area. A progressive prediction technique from “configuration, attribute to inversion” is proposed regarding reservoir characteristics therein. The results indicate that the internal reflection configuration of intervals with well-developed sand bodies is defined through seismic response characteristic analysis together with seismic forward modeling, the sensitive elastic parameters of sand bodies are clarified by petrophysical analysis; the channel shapes are characterized effectively by neural network clustering of reflection configuration in frequency domain; and the sand body thickness is predicted accurately with Bayesian stochastic inversion. Moreover, the sweet spots in the reservoir are identified by gas-bearing potential prediction. Under the influence of paleogeomorphology, there are a total of 4 SW-NE-striking channel sand bodies of strip-shaped distribution identified in the Upper Palaeozoic He 7 Member in the south of Binchang block, which are the favorable play fairways in exploration. While the channel sand bodies to the east are in isolated and scattered distribution. In practice, the targets selected under the guidance of the technique are proved to be high in quality by drilling. The lateral resolution of seismic prediction is high, serving for reflecting the change features of the channels and channel sand bodies truthfully. The sweet spot prediction in tight and thin sandstone reservoirs of strong heterogeneity

收稿日期:2021-03-02;修订日期:2021-09-03。

第一作者简介:刘玲(1984—),女,高级工程师,地震沉积、油气储层表征与评价。E-mail:liuling6203203@163.com。

基金项目:中国石化科技部重点攻关项目(P20062-4, P19022-2)。

can, thereby, be solved effectively, which is of guiding significance to future exploration and development.

Key words: reflection configuration, neural network waveform clustering in frequency domain, Bayesian stochastic inversion, gas-bearing potential prediction, He 7 Member, Binchang block

近年来,中国石油的长庆油田和延长油矿等在鄂尔多斯盆地南部上古生界下石盒子组和山西组取得勘探突破,多口井获工业气流,其中延安气田在下石盒子组1段(盒1段)、山西组2段(山2段)和山西组1段(山1段)等7个层位累计探明储量 $1\,808.65 \times 10^8 \text{ m}^3$,长庆陇东地区2017年和2018年先后在山西组和下石盒子组提交天然气预测储量 $2\,055.00 \times 10^8 \text{ m}^3$,探明储量 $318.86 \times 10^8 \text{ m}^3$,证实了盆地南部盆缘过渡带上古生界下石盒子组和山西组具备良好的天然气富集成藏条件,鄂尔多斯盆地满盆含气的格局已形成。中国石化彬长区块属于天然气勘探的战略突破区,前期研究认为,彬长区块上古生界与长庆陇东地区属于同一成藏区带,为岩性气藏,油气勘探潜力较大,其主要目的层为山2段及盒1段^[1-3]。但2019年部署钻探的CT1井在盒1段获 $7\,520 \text{ m}^3/\text{d}$ 的天然气,而上石盒子组7段(盒7段)却获 $26\,837 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产气流,突破了商业气流关。B2井在盒1段及山2段分别试获 $2.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 及 $1.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流,但盒7段未见油气显示,揭示了复杂的富集成藏规律。明确盒7段砂体展布规律,分析成藏富集条件,是扩大上古生界勘探层系的关键,但目前鄂尔多斯盆地南部研究主要集中于中生界延长组^[4-8],上古生界仅对山2段及盒1段的沉积和储层进行了初步研究^[9],盒7段基本尚未展开研究。

彬长区块盒7段砂岩厚度薄,河道频繁迁移叠置,岩性空间变化大,储层非均质性强,已钻井均位于区块北部三维地震区,地震资料主频25 Hz,频带宽度10~55 Hz,地震速度4 500 m/s,根据调谐频率与地层厚度关系,可识别砂岩厚度35 m,分辨率较低,且含气砂岩与泥岩波阻抗接近,岩石物理特征复杂,储层预测难度大,目前尚未建立储层地震预测模式,严重制约了进一步的勘探开发工作。为了准确预测致密砂岩甜点储层,提高勘探成功率,本文在沉积相、砂体发育特征研究基础上,针对鄂尔多斯盆地南部上古生界河道砂体,探索形成了一套“结构、属性、反演”逐级预测的甜点储层预测评价技术:储层地震响应特征分析及正演建模确定砂体发育段地震反射结构,岩石物理分析明确砂岩敏感弹性参数,频率域反射结构神经网络波形聚类识别河道外形,贝叶斯随机反演刻画砂体厚度,高频衰减油气检测识别有效含气砂岩,最后结合砂体分布

与含气性综合预测有利区。该方法在上古生界高效勘探中见到良好效果,可指导有利勘探区带及重点目标优选,为寻找规模气藏,形成鄂尔多斯盆地天然气勘探新的战略接替阵地提供技术支持。

1 地质背景及储层特征

鄂尔多斯盆地是一个长期发育,多类型叠加的大型复合盆地,蕴含丰富的油气资源。彬长区块位于鄂尔多斯盆地西南部,由彬县区块和长武区块构成,面积 $2\,949.911 \text{ km}^2$,构造位于伊陕斜坡和渭北隆起交汇处^[10],目前,彬长区块北部为三维地震覆盖区,面积 854.181 km^2 ,中部为二维地震测线区,南部尚无地震资料。本次研究区为彬长北部的三维地震区,位于构造相对稳定的伊陕斜坡,为平缓的北西倾单斜构造,局部发育小型低幅鼻状隆起,平均坡降6~8 km,地层倾角 $0.3^\circ \sim 0.6^\circ$ (图1)。上古生界向西减薄,自下而上主要发育石炭系太原组、二叠系山西组、下石盒子组、上石盒子组及石千峰组,上石盒子组自下而上又可细分为盒5段、盒6段、盒7段和盒8段(图1b),其中,盒7段是研究区的主力产气层之一,也是鄂尔多斯盆地下一步的重点勘探新层系。

石盒子组沉积时,彬长区块整体处于三角洲平原与三角洲前缘过渡带,为辫状河三角洲平原亚相,可细分为三角洲平原分流河道及分流河道间沉积,物源来自西南部陇西古陆^[11-13],储层类型主要为分流河道砂体,砂体纵向上相互叠置,平面上呈南西-北东向条带状展布(图1c),横向连续性差,非均质性强,岩性以中-粗粒砂岩为主,单砂体厚度3~11 m,平均厚度8 m,受沉积相和成岩相双重控制,砂岩储层以残余粒间孔和溶蚀孔为主,胶结作用强,储层物性差,平均孔隙度为5.6%,平均渗透率为 $1.9 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为典型的薄层致密砂岩储层^[14-15],气藏分布受构造影响不明显,为岩性气藏,优质储层是天然气富集的关键因素。前期研究主要集中于山西组及下石盒子组,上石盒子组基本尚未开展研究,储层地震预测模式尚未建立,甜点储层分布范围亟待解决。

2 储层地球物理特征

层位精细解释是储层地球物理特征分析及地震反

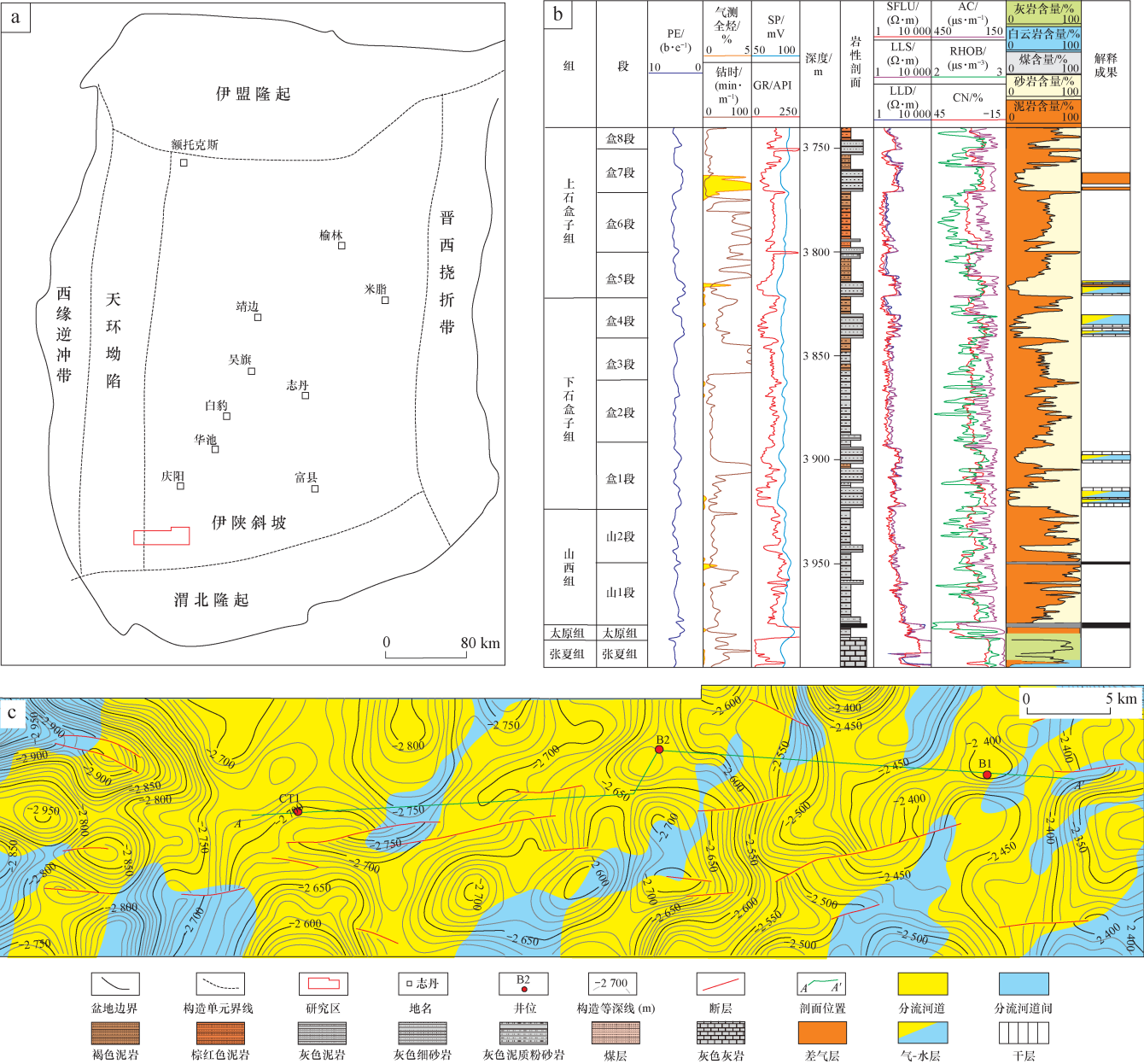


图 1 鄂尔多斯盆地南部彬长区块构造位置及 CT1 井地层综合柱状图

Fig. 1 Map showing the tectonic location of Binchang block and stratigraphic column in Well CT1, southern Ordos Basin

a. 构造位置; b. CT1 井地层综合柱状图; c. 盒 7 段沉积相及构造等深线叠合图

演的重要基础,根据地层发育及地震反射波组特征,通过合成地震记录,对反射波组进行准确标定(图 2a)。上古生界底部低阻煤系地层与下古生界高阻碳酸盐岩沉积形成波峰强反射界面 T_9 ,该界面反射能量强、连续性好,容易对比追踪,可作为区域标志层,在 T_9 确定的情况下,对上古生界进行标定,以分析目的层段储层的地震响应特征。通过标定, T_9^f 为上石盒子组底界,为中等-弱波峰反射,断断续续,追踪困难; T_9^{f-1} 为盒 7 段底界,反射能量中等-弱,断断续续,追踪困难; T_9^g

为石千峰底界,反射能量中等-弱,连续性较好,尚可追踪(图 2b)。

2.1 地震响应特征

根据钻井揭示砂体发育情况,结合正演模型,对地震反射波的振幅、频率、相位、连续性、反射结构、几何形态及其与上、下反射波的接触关系等特征进行分析,总结不同砂体叠置模式的地震响应特征,建立砂体发育段有利地震反射结构。根据 3 口已钻井,将彬长区

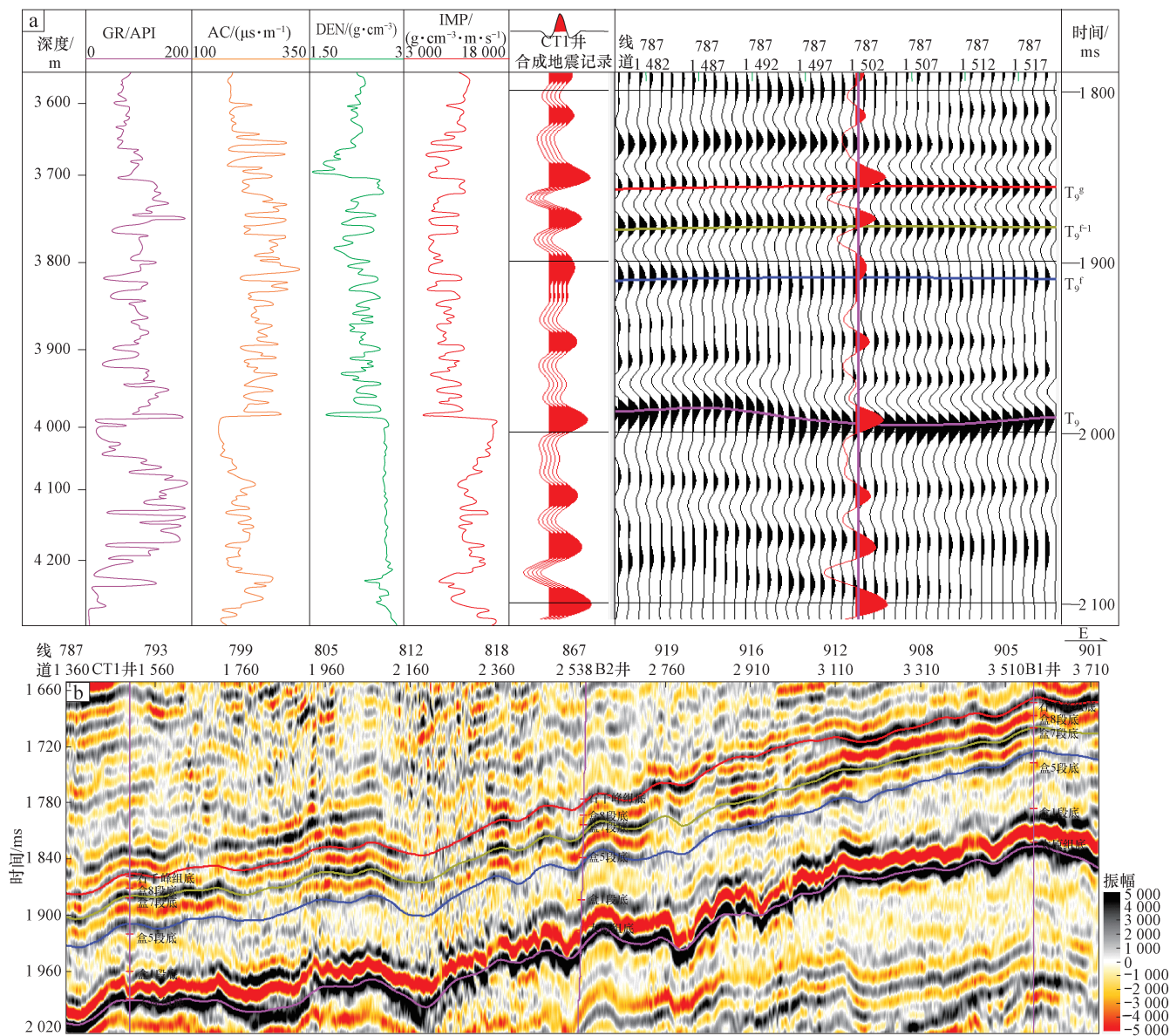


图2 鄂尔多斯盆地南部彬长区块井-震标定
Fig. 2 Well-to-seismic calibration of Binchang block, southern Ordos Basin
a. CT1 井合成地震记录; b. 过 CT1—B2—B1 井的地震剖面
 T_9^g : 上古生界底; T_9^f : 上石盒子组底; T_9^{f-1} : 盒 7 段底; T_9^g : 石千峰组底

块盒 7 段砂体分为两类,其中,Ⅰ类砂体为储集物性较好、厚度较大的砂岩,钻井显示为差气层或含气层,测井上表现为盒 7 段底部为一套较纯的厚砂岩,GR 曲线为弱齿化箱形,上部为厚层泥岩,代表井为 CT1 井及 B2 井,其盒 7 段底部钻遇的砂岩厚度分别为 12 m 和 8 m,地震上表现为 T_9^g 与 T_9^{f-1} 高频、中-强反射特征;Ⅱ类砂岩储集物性差、厚度薄,主要为砂、泥薄互层,反映泥质含量较高或细粒沉积物,代表井为 B1 井,其底部仅发育 2.37 m 厚的薄砂岩,为水层,GR 曲线为指状,地震上 T_9^g 下波谷低频弱波谷反射(图 3)。因此,彬长区块盒 7 段河道砂体主要表现为高

频、中-强反射结构特征,可根据该特征定性识别河道砂体边界。

2.2 岩石物理特征

精细的岩石物理分析及敏感弹性参数筛选是储层预测的基础。根据测井资料及岩石物理交会图(图 4),彬长区块上古生界盒 7 段砂岩测井响应特征主要表现为“三低两高”特征,即低自然伽马、低密度和低中子孔隙度,较高声波时差和较高电阻率。和致密砂岩相比,含气砂岩的声波时差略微增大,密度略微减小,深、浅侧向电阻率出现明显的正幅度差。由此可见,盒 7

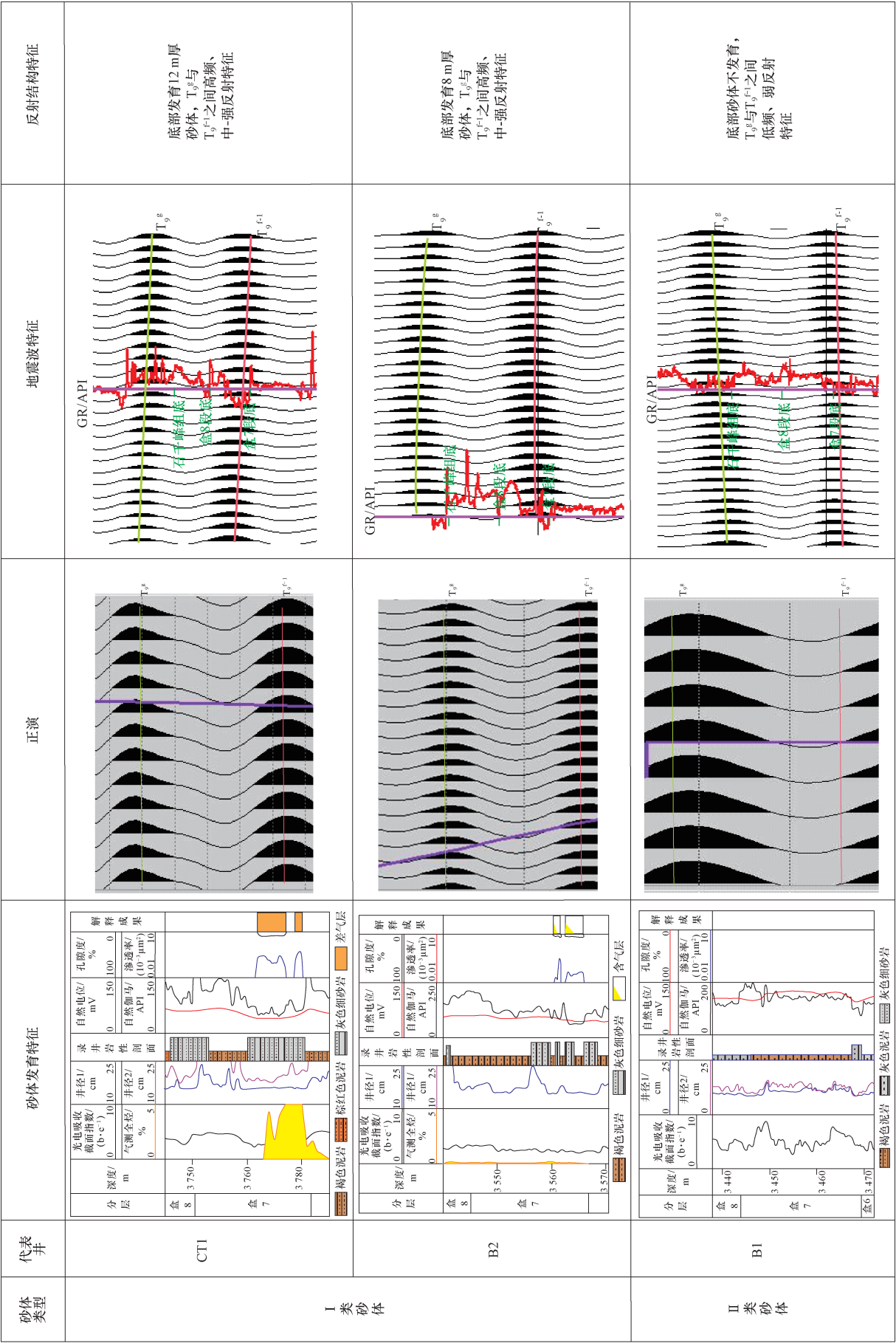


图3 鄂尔多斯盆地南部彬长区块盒7段储层反射结构特征
Fig. 3 Reflection configuration characteristics of the channel sand bodies in the He 7 Member, Binchang block, southern Ordos Basin
 T_9^{f-1} : 盒7段底; T_9^g : 石千峰组底;

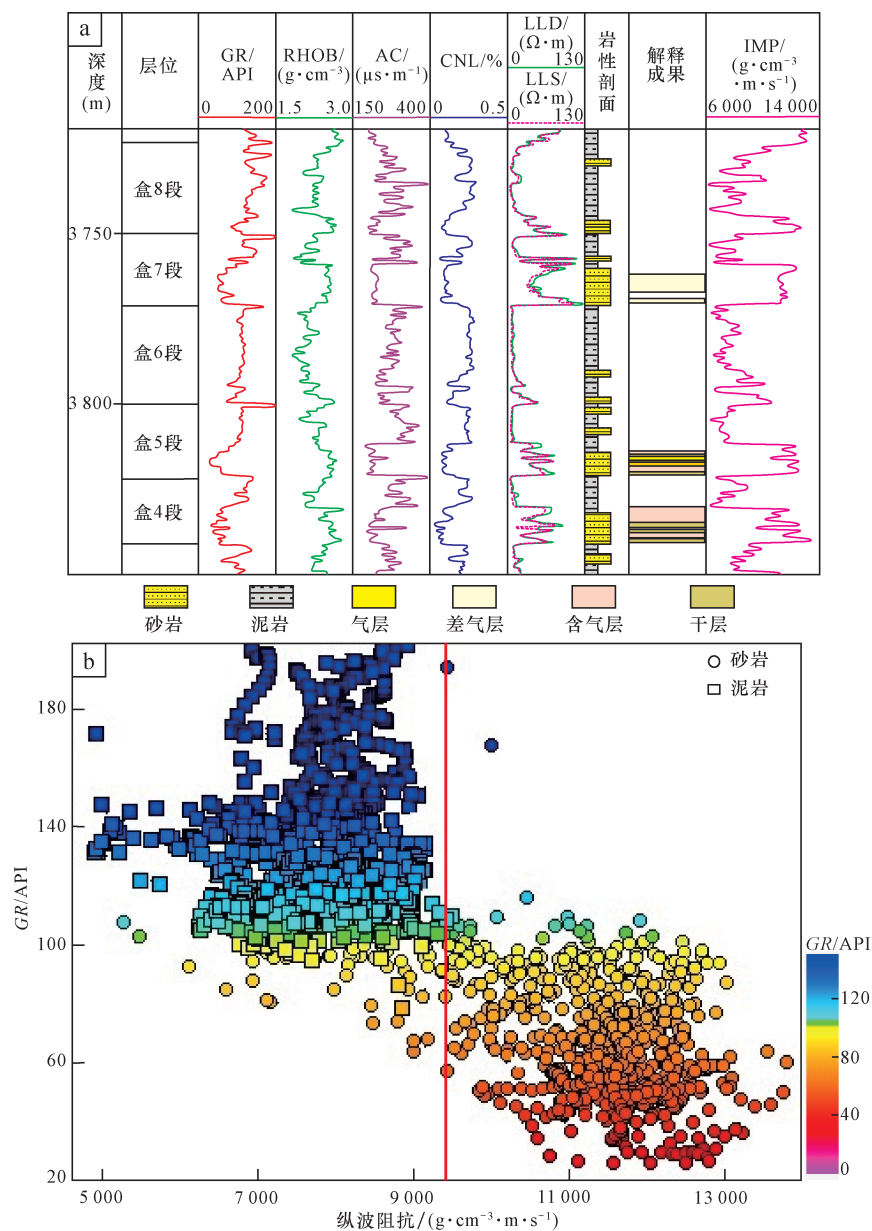


图 4 鄂尔多斯盆地南部彬长区块盒 7 段岩石物理特征

Fig.4 Petrophysical characteristics of He 7 Member in Binchang block, southern Ordos Basin

段砂岩整体为高声波阻抗特征,砂、泥岩的阻抗门槛值约为 $9\,400\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,可通过阻抗反演定量预测盒 7 段砂岩分布,但纵波阻抗只可区分岩性,无法确定储层物性,对储层与非储层的分辨能力较低^[16],因此,需通过含气性预测进一步预测甜点储层。

3 储层预测

3.1 频率域反射结构神经网络波形聚类识别河道外形

沉积相带控制优质储层发育,主河道为水动力较强的高能环境,沉积物颗粒粗,分选好,石英体积分数高,储集物性相对较好;河道边缘水动力减弱,沉积物

颗粒变细,填隙物增加,砂体物性明显变差^[17],因此,可通过河道外形定性预测优质储层分布。勘探实践证明,受地震资料品质等多因素影响,传统的相面法存在一定局限性^[18],但一般沉积体系都具有宽度远远大于厚度的特征^[19],因此,利用地震垂向分辨率难以识别的地震体,在平面上有可能通过地震横向分辨率进行识别。地震属性种类繁多,预测结果具有多解性,波形更好地代表了地震波的振幅、频率、相位等参数特征,不同的波形表示不同的地震相^[20]。此外储层地震响应特征分析也表明,彬长区块盒 7 段有利砂体为高频、中强振幅反射特征,波谷较窄;而非储层为低频、弱振幅反射特征,波谷较宽,因此,本研究充分利用地震资

料横向分辨率,通过波形聚类属性表征河道外形。彬长区块上古生界地层向西减薄,波形聚类数据是不等长时窗的,时间域神经网络处理不等长时窗的方式是将所有波形插值成等长波形,然后计算波形之间的相似度;频率域聚类将可变目的层段的波形变到频率域中,插值成等长的频率域信号,然后在频率域中进行聚类,避免了时间域中对波形截断造成的信息损失和拉伸压缩造成的波形改变,使聚类结果更加准确。因此,本研究主要采用频率域反射结构神经网络聚类识别河道外形。

通过平剖双面解释技术^[21]建立波形聚类结果与不同类型储层之间的关系,频率域反射结构神经网络波形聚类平面图上的红色、黄色区在地震剖面上为高频、中-强反射特征(图5a),表征有利储层发育区,蓝色区域对应地震剖面的低频弱波谷反射特征,为分流河道间非储层发育区。根据频率域反射结构神经网络波形聚类结果(图5b),彬长区块上古生界盒7段主要发育4条南西-东北向条带状展布的主河道,复合河道宽度6~19 km,研究区东南角河道不发育,CT1井及B2井位于河道主体部位,B1井处于河道边缘,钻井结果显示,CT1井及B2井盒7段分别发育12 m和8 m厚的砂岩储层,而B1井盒7段砂岩不发育,钻井结果与地震预测相吻合,说明通过频率域反射结构神经网络聚类分析识别河道外形是较为准确和可靠的。

3.2 贝叶斯随机反演刻画砂体厚度

频率域反射结构神经网络聚类属性定性预测了河道外形,初步确定了河道砂体的分布范围,而反演充分利用地震资料的横向分辨率和测井资料的垂向分辨率提高地震资料分辨率^[22-23],可实现储层的定量预测。反演方法较多,常规反演建模的均匀插值降低了反演的横向分辨率,破坏了沉积体的构形特征;地质统计学反演结合了地质、测井和三维地震数据,具有高分辨率的优势,但高频部分的随机模拟使反演结果横向不连续,随机性强,计算效率也低,同时,它要求井均匀分布,不能满足复杂形状的沉积体^[24-25]。贝叶斯随机反演能解决常规反演建模插值问题,克服了地质统计学高频随机性,可解决复杂地层、薄层插值建模及反演难的问题。因此,本次采用贝叶斯随机反演定量预测砂岩厚度。

贝叶斯随机反演由构形建模和蒙特卡洛马尔夫链(MCMC)随机反演构成,构形模型通过中频地震信息指导中高频测井信息外推,用反射构形代替变差函数描述变量空间结构,确保同一相带的井合理插值;MCMC随机反演在构形模型的基础上,通过相控随机高频扰动及地震合成记录约束,修正全频带反演结果。地震的不同频段反映不同尺度地质体的构

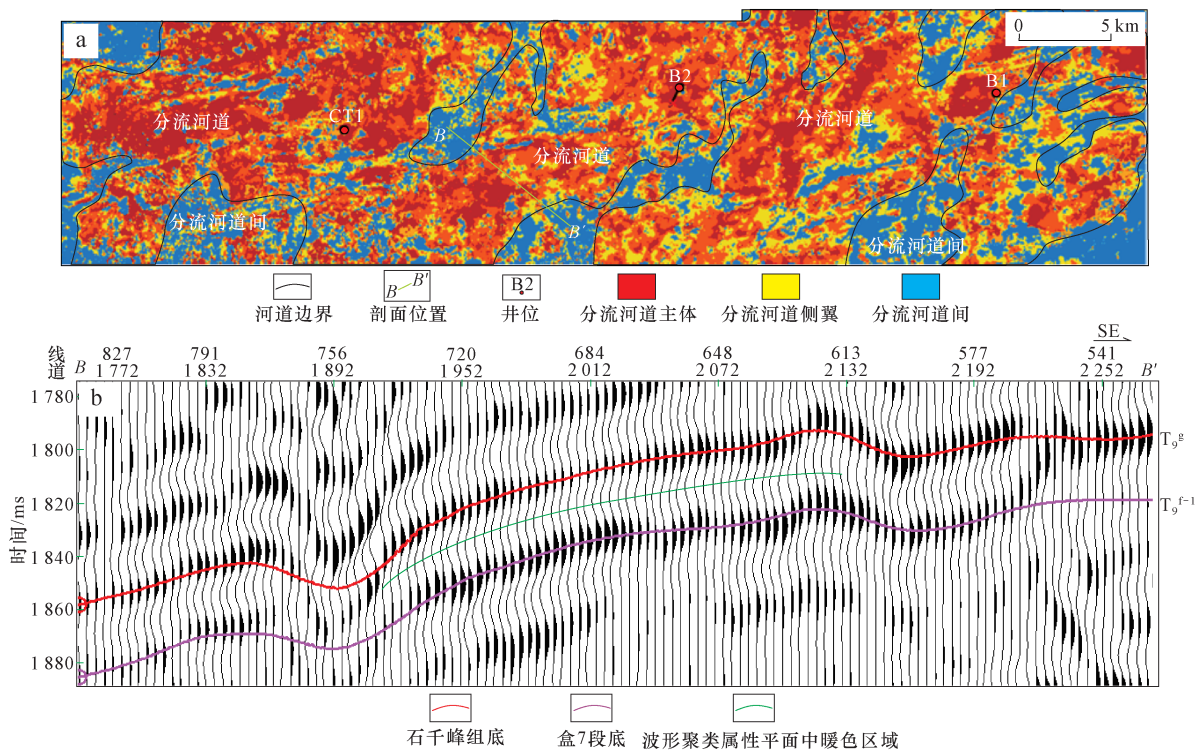


图5 鄂尔多斯盆地南部彬长区块盒7段频率域反射结构神经网络聚类分析(a)及剖面特征(b)

Fig. 5 Neural network clustering of the reflection configuration in frequency domain (a) and profile characteristics (b) of

He 7 Member in Binchang block, southern Ordos Basin

形特征,贝叶斯随机反演是一个分频施策和融合表征的过程,即在建模时不同频带采用不同的计算策略,具体如图 6 所示:第 1 部分为低频部分,是常规建模确定性插值的结果;第 2 部分为中频,控制着整个模型体的结构趋势,通过地震谱反演^[26]获得;第 3 部分为高频相控建模,即地震属性参考下的井曲线外推,测井曲线相似性及井距二元控制插值系数,以获得合理的纵向分辨率,以上 3 个部分组合为构形建模的结果,构形建模增加了 200 Hz 以下的测井确定性建模,减少随机模拟频率范围,更有利于变差函数拟合,反演稳定性大大加强,符合地震产状。第 4 部分为超高频,通过相控井高频扰动,修正反演结果,具体做法是将波形相控建模结果作为先验信息的均值和井信息的高频统计方差,形成先验分布,合成记录误差及反射系数之和服从高斯分布,通过贝叶斯判别,修正波形相控高频的结果,与地震更为吻合,值域与井更为接近。图 6b 为 CT1 井构形建模、MCMC 反演结果与声波阻抗对比图,相比于构形建模,MCMC 反演的值域及曲线形态与阻抗曲线吻合度更高,说明 MCMC 反演更为合理和准确。

过井的贝叶斯随机反演剖面显示(图 7),剖面两侧的 CT1 井及 B1 井作为约束井参与到反演过程,而中间的 B2 井则作为验证井。从图中可见,贝叶斯随机反演垂向上具有较高的分辨率,横向上忠实于地震,岩性变化特征丰富,尖灭清晰,验证井 B2 井盒 7 段发育 8 m 厚的砂岩,反演剖面上为高声波阻抗特征,反演结果与实钻结果相吻合,井间砂岩变化合理,说明贝叶斯随机反演结果较为准确和可靠。

以盒 7 段为统计时窗,9 400 g·cm⁻³·m·s⁻¹为砂岩阻抗门槛值统计了盒 7 段沉积时砂岩的时间厚度,并以 4 500 m/s 为砂岩速度,计算了砂岩厚度平面图(图 8a)。同时,通过地层残余厚度表征了盒 7 段沉积前的古地貌图(图 8b),残余厚度越大,表征古地貌越低,残余厚度越小,表征古地貌越高。图 8b 中黄 -

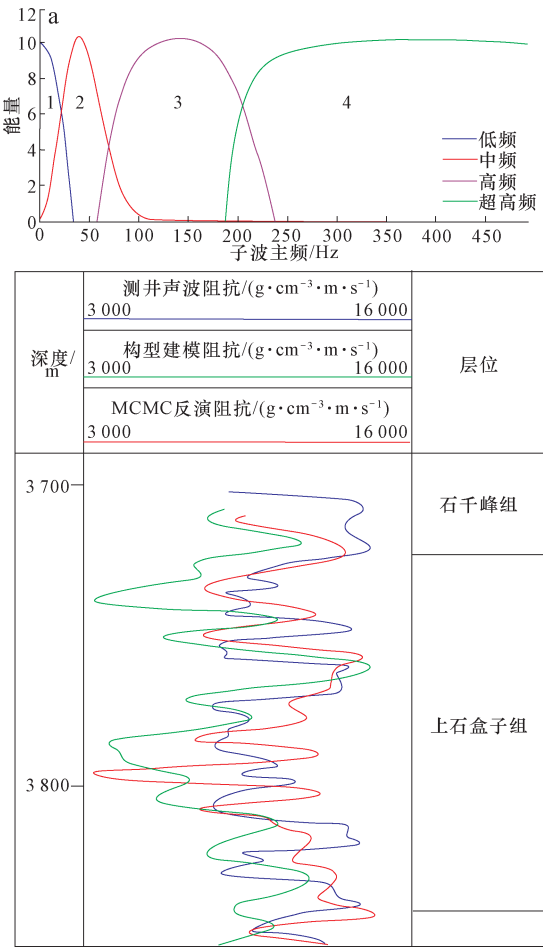


图 6 鄂尔多斯盆地南部贝叶斯随机反演频率(a)及 CT1 井反演曲线对比(b)

Fig. 6 Frequencies of Bayesian stochastic inversion (a) and the comparison of inversion curves in Well CT1 (b), southern Ordos basin

红色为残余厚度较小地区,表征高地貌区。从砂岩厚度平面图上可见(图 8a),盒 7 段沉积时,研究区中西部砂岩较为发育,成南西 - 北东向条带状分布,西部砂岩不发育,主要呈零星状分布。古地貌控制了盒 7 段砂体的差异分布,盒 7 段沉积前,彬长地区 B2 井以西为高地貌区,可容纳空间较小,沉积物供给速率大于可

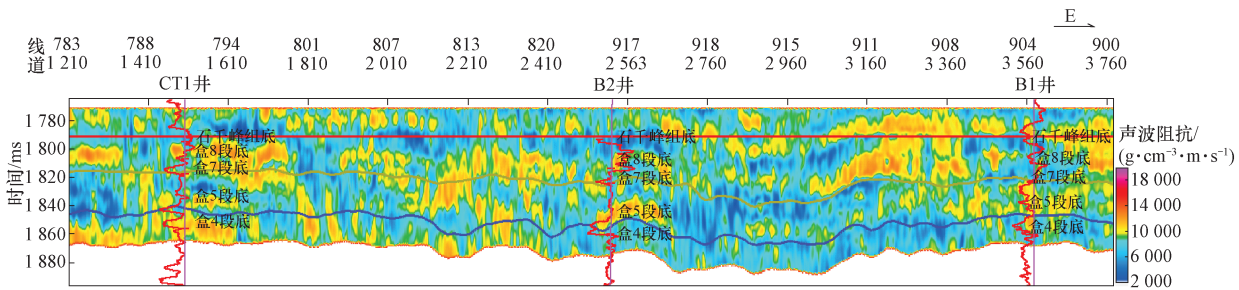


图 7 鄂尔多斯盆地南部彬长区块盒 7 段贝叶斯随机反演剖面

Fig. 7 Bayesian stochastic inversion section of He 7 Member in Binchang block, southern Ordos Basin

T₉^f. 上石盒子组底; T₉^{f-1}. 盒 7 段底; T₉^o. 石千峰组底

容纳空间变化率,主要发育叠切型河道砂,河道相互叠置切割,平面展布范围广,厚度大;B2 井以东处于古地貌低部位,可容纳空间较大,沉积物供给速率小于可容纳空间变化率,主要发育孤立型或单置型河道砂,砂体不发育,呈零星分布,厚度小,而该区泥岩较发育,后期易形成岩性圈闭遮挡。

3.3 高频衰减识别有效含气砂岩

国内、外致密薄储层含气性预测一直处于不断探索研究中,叠前弹性参数反演和地震衰减是含气性识别的两个主要技术^[27-36]。彬长区块未收集到叠前地震数据,因此,本研究主要根据双相介质理论,利用叠后地震的频率衰减属性预测地层含油性^[37-41],以降低储层预测多解性,刻画甜点储层发育区。频率衰减

属性的计算方法较多,包括面积差值法、低频谐振法、频率衰减梯度和振幅衰减梯度等,根据研究区资料特点,主要采用面积差值法,通过广义 S 变换计算高频衰减,以定性预测含气性。高频衰减属性值越大的地区,表征含气性越好。CT1 井盒 7 段目前已试获 26 837 m³/d 的高产工业气流,B2 井盒 7 段尚未试气,测井解释为含气层。地震高频衰减属性上,CT1 井处于红色区,表征含气性较好,B2 井处于黄色区,表征含气,但含气性不如 CT1 井。B1 井盒 7 段测井解释为水层,该井在高频衰减属性上处于蓝色低值区,指示不含气,由此可见,地震预测与钻井结果相吻合,说明高频衰减属性可有效预测彬长地区盒 7 段致密砂岩含气性。根据高频衰减属性(图 9),彬长区块盒 7 段含气层主要呈北东-南西向条带状分布于河道主体上,整

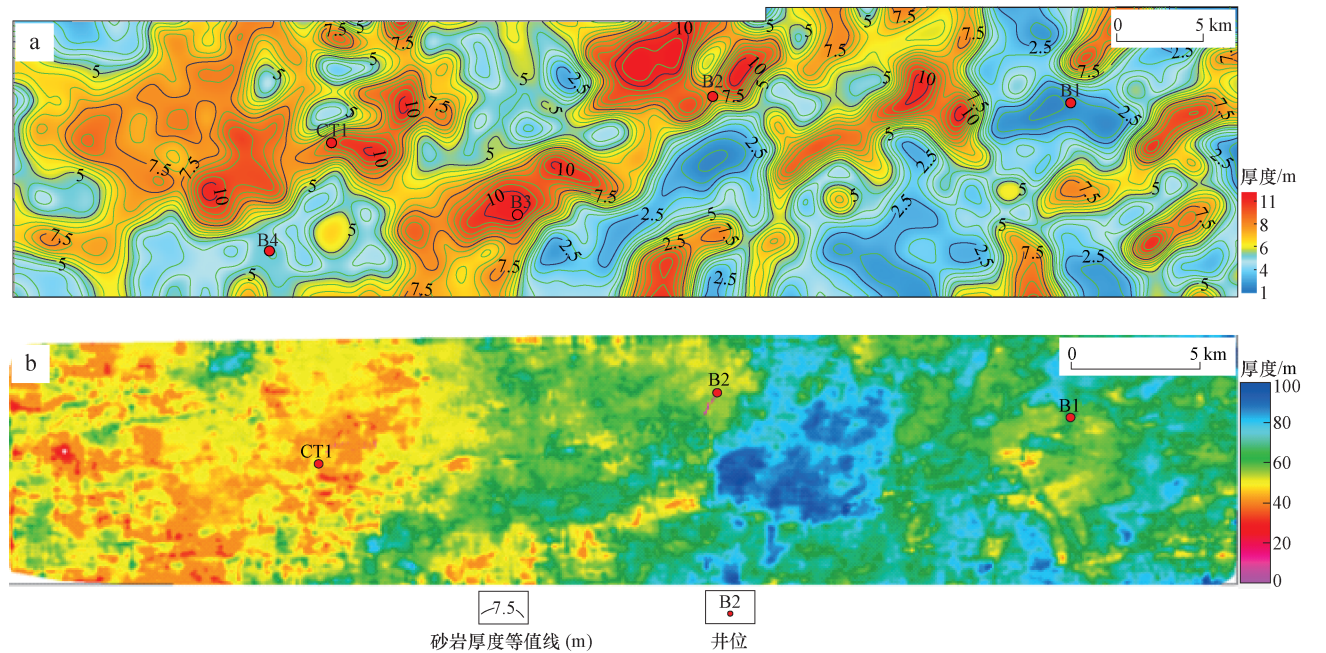


图 8 鄂尔多斯盆地南部彬长区块盒 7 段砂岩厚度平面分布及古地貌

Fig. 8 Isopach map of sandstone and palaeomorphology of He 7 Member in Binchang block, southern Ordos Basin

a. 砂岩厚度;b. 古地貌,黄-红色为地层残余厚度较小的地区,表征高地貌区

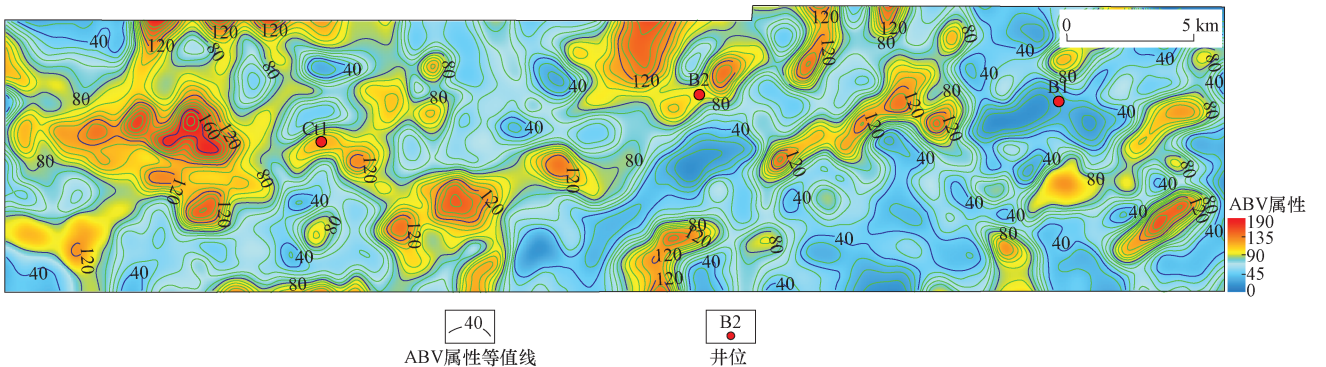


图 9 鄂尔多斯盆地南部彬长区块盒 7 段高频衰减属性

Fig. 9 Contour map showing the high frequency attenuation attribute of He 7 Member in Binchang block, southern Ordos Basin

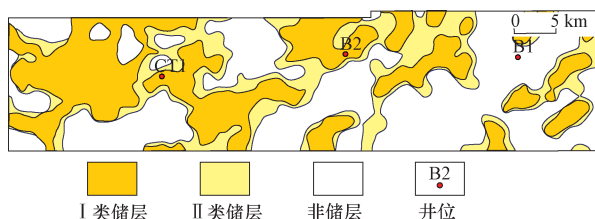


图10 鄂尔多斯盆地南部彬长区块盒7段有利区预测

Fig. 10 Reservoir mapping of He 7 Member in Binchang block, southern Ordos Basin

体发育4个含气条带,为下一步勘探的甜点区,B1井东侧含气性差,基本不含气,而地震属性及反演预测图上,研究区东侧河道不发育,仅零星可见,这也说明含气性预测结果是较为准确和可靠的。

3.4 有利区预测

结合砂岩厚度图及含气性预测图,综合预测了彬长区块上古生界盒7段致密砂岩有利区(图10),整体上,彬长区块盒7段致密砂岩可以划分为3类。I类储层为河道砂体与含气区的叠合部位,主要发育于河道主体部位,储层物性较好,为勘探首选目标,CT1井及B2井均位于I类储层发育区,CT1井在盒7段已获 $26\,837\text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流,B2井盒7段目前虽未测试,但测井解释为8.00 m含气层;II类储层为河道侧翼,相对于I类储层,其储层物性较差,不含气,B1井位于II类储层发育区,测井解释为2.37 m的水层;河道间泥质沉积则为非储层发育区。

3.5 应用效果分析

利用“结构、属性、反演”等多种储层预测技术综合评价分析,降低储层预测多解性,通过预测,盒7段砂组共落实矿权内有利面积 $1\,343\text{ km}^2$,储层厚度8~16 m,根据《长庆油田城探2井区新增天然气预测地质储量报告》,取 $0.5 \times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$ 的储量丰度,计算圈闭资源量为 $671.5 \times 10^8\text{ m}^3$ 。同时,将该方法类比运用到研究区盒4段及盒1段的甜点储层预测中,落实了盒4段及盒1段矿权内有利面积分别为 $1\,352\text{ km}^2$ 及 $1\,423\text{ km}^2$,圈闭资源量分别为 $676.5 \times 10^8\text{ m}^3$ 及 $711.5 \times 10^8\text{ m}^3$ 。B3及B4井为预测后新钻的两口井(图8a),钻井揭示,两口井盒7段砂岩厚度分别为15.3 m及3.6 m,地震预测厚度分别为10.5 m及4.0 m,地震预测厚度与实钻结果吻合度较高,说明贝叶斯随机反演预测的储层厚度是较为准确和可靠的。目前这两口井正待试气中。

4 结论

1) 频率域反射结构神经网络波形聚类避免了时

间域中对波形截断造成的信息损失和拉伸压缩造成的波形改变,使聚类结果更加准确;贝叶斯随机反演能解决常规反演建模插值问题,克服了地质统计学高频随机性,具有较高的纵横向分辨率,可解决复杂地层、薄层问题插值建模及反演难的问题,适用于薄互层地区的储层预测。

2) 针对彬长区块上古生界盒7段薄储层、强非均质性、地震信噪比及分辨率低的特点,提出了储层地震响应特征基础上利用频率域反射结构神经网络波形聚类定性识别河道外形、贝叶斯随机反演定量刻画砂体厚度、高频衰减识别有效含气砂岩、砂体厚度及含气性叠合综合预测有利区的地震逐级预测技术,通过地震逐级预测约束,有效刻画了有利储层发育区,为下一步的勘探部署指明了方向,提高了勘探开发目标预测精度。

3) 彬长区块盒7段有利砂体呈高频、中-强反射结构地震响应特征,河道砂体主要呈北东-南西向条带状发育于研究区西部,东部地区河道砂体零星分布,含气区主要位于河道主体部位,河道侧翼储层物性差,基本不含气,综合预测显示,I类储层为河道主体及含气区的叠合部位,为下一步勘探首选目标,II类储层为河道侧翼,基本不含气,河道间为非储层发育区,通过预测,落实矿权内有利勘探面积 $1\,343\text{ km}^2$,圈闭资源量为 $671.5 \times 10^8\text{ m}^3$ 。

参 考 文 献

- [1] 贺敬聪,朱筱敏,李明瑞,等.鄂尔多斯盆地陇东地区二叠系山西组-石盒子组母岩类型和构造背景[J]. 古地理学报,2017,19(2):285-298.
He Jingcong, Zhu Xiaomin, Li Mingrui, et al. Parent rock types and tectonic setting of the Permian Shanxi and Shihezi Formations in Longdong area, Ordos Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(2): 285-298.
- [2] 李军,王禹诺,赵靖舟,等.鄂尔多斯盆地陇东地区上古生界天然气富集规律[J]. 石油与天然气地质,2016,37(2):180-188.
Li Jun, Wang Yunuo, Zhao Jinzhou, et al. Accumulation patterns of natural gas in the Upper Paleozoic in Longdong area, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 180-188.
- [3] 张洪洁,王凤琴,刘航,等.鄂尔多斯盆地东南部长7段页岩气含气量及影响因素[J]. 新疆石油地质,2019,40(6):666-672.
Zhang Hongjie, Wang Fengqin, Liu Hang, et al. Shale gas content and its influencing factors in Chang 7 Member of Southeastern Ordos Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(6): 666-672.
- [4] 刘春燕,李松,孙冬胜,等.致密砂岩储层非均质性及有效储层保证:以鄂尔多斯盆地南部彬长地区三叠系延长组长7段为例[J]. 世界地质,2017,36(4):1170-1179.
Liu Chunyan, Li Song, Sun Dongsheng, et al. Heterogeneity and effective reservoir characterization of tight sandstone reservoirs: A case study of Chang-7 section of Triassic Yanchang Formation in Binchang area of southern Ordos Basin [J]. Global Geology, 2017, 36(4):

- 1170-1179.
- [5] 万旸璐, 过敏, 李仲东, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘彬长地区延长组7致密油成藏条件及控制因素[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2017, 32(1): 14-22.
- Wang Yanglu, Guo Min, Li Zhongdong, et al. Accumulation conditions and controlling factors of Chang 7 tight oil in Yanchang Formation, Binchang region, southwest of Ordos Basin [J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2017, 32(1): 14-22.
- [6] 李志明, 陶国亮, 黎茂稳, 等. 鄂尔多斯盆地西南部彬长区块三叠系延长组7段3亚段页岩油勘探前景探讨[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(3): 558-570.
- Li Zhiming, Tao Guoliang, Li Maowen, et al. Discussion on prospecting potential of shaleoil in the 3th sub-member of the Triassic Chang 7 Member in Binchang Block, southwestern Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2019, 40(3): 558-570.
- [7] 范久宵, 黎小伟, 袁春艳, 等. 90°相位转换技术在储层预测中的应用——以鄂尔多斯盆地彬长区块长8¹油层组为例[J]. 石油与天然气地质, 2016, 37(2): 286-290.
- Fan Jiuxiao, Li Xiaowei, Yuan Chunyan, et al. Application of 90° phase rotation technique in reservoir prediction: A case study from the Chang 8¹ reservoir in Binchang Block, Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(2): 286-290.
- [8] 刘振峰, 张金强, 韩磊, 等. 鄂南长8段致密油地震流体识别技术应用实践[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(3): 541-548.
- Liu Zhenfeng, Zhang Jinqiang, Han Lei, et al. Geophysical fluid recognition for tight oil in Chang 7 Member, south Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(3): 541-548.
- [9] 李松, 刘玲, 吴疆, 等. 鄂尔多斯盆地南部山西组一下石盒子组致密岩成岩演化[J]. 天然气地球科学, 2021, 32(1): 47-56.
- Li Song, Liu Ling, Wu Jiang, et al. Diagenetic evolution of tight sandstone of Shanxi-Lower Shihezi Formations in the southern Ordos Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2021, 32(1): 47-56.
- [10] 闵琪, 付金华, 席胜利, 等. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气运移聚集特征[J]. 石油勘探与开发, 2000, 27(4): 26-29.
- Min Qi, Fu Jinhua, Xi Shengli, et al. Characteristics of natural gas migration and accumulation in the Upper Paleozoic of Ordos Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(4): 26-29.
- [11] 汪正江, 张锦泉, 陈洪德. 鄂尔多斯盆地晚古生代陆源碎屑沉积源区分析[J]. 成都理工学院学报, 2001, 28(1): 7-12.
- Wang Zhengjiang, Zhang Jinquan, Chen Hongde. Study of the dispositional provenance of the terrigenous detritus in Ordos Basin in late Paleozoic era [J]. Journal of Chengdu University of Technology, 2001, 28(1): 7-12.
- [12] 陈全红, 李文厚, 王亚红, 等. 鄂尔多斯盆地西南部晚古生代早—中期物源分析[J]. 现代地质, 2006, 20(4): 628-634.
- Chen Quanhong, Li Wenhui, Wang Yahong, et al. The analysis of sediment provenance in early-middle period of late Paleozoic in the southwest of Ordos Basin [J]. Geoscience, 2006, 20(4): 628-634.
- [13] 李秋朋, 万友利, 将琦, 等. 鄂尔多斯盆地彬长地区长6储层成岩作用及有利成岩相带[J]. 沉积与特提斯地质, 2016, 36(4): 21-28.
- Li Qiupeng, Wan Youli, Jiang Qi, et al. Diagenesis and favourable diagenesis facies zones of the Chang-6 oil reservoirs in the Binxian-Changwu region, Ordos Basin [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2016, 36(4): 21-28.
- [14] 张哨楠. 致密天然气致密砂岩储层: 成因和讨论[J]. 石油与天然气地质, 2008, 29(1): 1-10.
- Zhang Shaonan. Tight sandstone gas reservoirs: Their origin and discussion [J]. Oil & Gas Geology, 2008, 29(1): 1-10.
- [15] 张水昌, 米敬奎, 刘柳红, 等. 中国致密砂岩煤成气藏地质特征及成藏过程——以鄂尔多斯盆地上古生界与四川盆地须家河组气藏为例[J]. 石油勘探与开发, 2009, 36(3): 320-330.
- Zhang Shuichang, Mi Jingkui, Liu Liuhong, et al. Geological features and formation of coal-formed tight sandstone gas pools in China: Cases from Upper Paleozoic gas pools, Ordos Basin, and Xujiache formation gas pools, Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2009, 36(3): 320-330.
- [16] 苑书金. 鄂尔多斯盆地大牛地气田下石盒子组地震储层预测技术的研究和应用[J]. 石油地球物理勘探, 2008, 43(1): 48-52.
- Yuan Shujin. Study on technique of lower Shihezi Formation reservoir prediction in Daniudi gasfield of Ordos Basin by seismic and application [J]. Oil Geophysical Exploration, 2008, 43(1): 48-52.
- [17] 武春英, 韩会平, 康锐, 等. 鄂尔多斯盆地苏里格南部地区盒8段沉积相特征及其意义[J]. 地球科学与环境学报, 2014, 36(4): 77-86.
- Wu Chunying, Han Huiping, Kang Rui, et al. Characteristic and significance of sedimentary facies in He-8 Member in the southern Sulige area of Ordos Basin [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2014, 36(4): 77-86.
- [18] 刘玲, 王烽, 刘玉霞. 地震沉积学在生物礁滩体识别中的应用[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(3): 342-346.
- Liu Ling, Wang Feng, Liu Yuxia. Application of seismic sedimentology to organic reef-bank body identification in Y District [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(3): 342-346.
- [19] Liu L, Tang D Z, Xu H, et al. Reservoir prediction of deep-water turbidite sandstones with seismic lithofacies control-A case study in the C Block of lower Congo Basin [J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 71, 1-11.
- [20] 赵力民, 郎晓玲, 金凤鸣, 等. 波形分类技术在隐蔽油藏预测中的应用[J]. 石油勘探与开发, 2001, 28(6): 53-55.
- Zhao Limin, Lang Xiaoling, Jin Fengmin, et al. Application of waveform classification in the prediction of subtle reservoirs [J]. Petroleum Exploration and Development, 2001, 28(6): 53-55.
- [21] 刘力辉, 王绪本. 双域、双面沉积体解释方法在L区的应用[J]. 石油物探, 2011, 50(2): 155-159.
- Liu Lihui, Wang Xuben. Application of double-domain & double-plane interpretation method on sedimentary bodies in L Block [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2011, 50(2): 155-159.
- [22] 杜立筠, 吴志强, 龙利平. 鄂尔多斯盆地中生界低幅度构造岩性圈闭油气储层预测技术[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(10): 59-63.
- Du Lijun, Wu Zhiqiang, Long Liping. Prediction of lithologic reservoir in the Mesozoic low amplitude structures of Ordos Basin [J]. Marine Geology Frontiers, 2013, 29(10): 59-63.
- [23] Du L L, Tang D Z, Wo Y J, et al. Favorable area prediction of tight sandstone: A case study of the He 8 Formation in the Kangning area, Eastern Ordos Basin, China [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 175: 430-443.
- [24] 袁春艳, 贾家磊, 张红. 地质统计反演在鄂尔多斯盆地南部彬长区块储层预测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(1): 77-81.
- Yuan Chunyan, Jia Jialei, Zhang Hong. The application of geological

- statistics to reservoir prediction [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2016, 13(1): 77–81.
- [25] 李方明, 计智锋, 赵国良, 等. 地质统计反演之随机地震反演方法——以苏M盆地P油田为例[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(4): 451–455.
- Li Fangming, Ji Zhifeng, Zhao Guofeng, et al. Methodology and application of stochastic seismic inversion: A case from P oilfield, M Basin, Sudan [J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(4): 451–455.
- [26] 毕俊凤, 杨培杰. 有色反演技术在少井区岩性体预测中的应用[J]. 物探与化探, 2014, 38(3): 558–565.
- Bi Junfeng, Yang Peijie. The application of colored inversion to reservoir prediction in sparse well zone [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2014, 38(3): 558–565.
- [27] 鲜强, 冯许魁, 刘永雷, 等. 塔中地区碳酸盐岩缝洞型储层叠前流体识别[J]. 石油与天然气地质, 2019, 40(1): 196–204.
- Xian Qiang, Feng Xukui, Liu Yonglei, et al. Pre-stack fluid identification for fractured-vuggy carbonate reservoir in Tazhong area [J]. Oil & Gas geology, 2019, 40(1): 196–204.
- [28] 时磊, 刘俊州, 董宁, 等. 扩展弹性阻抗反演技术在致密砂岩薄储层含气性预测中的应用[J]. 物探与化探, 2015, 39(2): 346–351.
- Shi Lei, Liu Junzhou, Dong Ning, et al. Extended elastic impedance inversion technology and its application to the tight and thin sandstone reservoir [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(2): 346–351.
- [29] 邵林海, 王九拴, 张雷, 等. 叠前同时反演在低渗型砂岩储层预测及含气性检测中的应用[J]. 地质科技情报, 2016, 35(3): 145–150.
- Shao Linhai, Wang Jiushuan, Zhang Lei, et al. Application of Pre-stack simultaneous inversion in low porosity and permeability sandstone reservoirs prediction and hydrocarbon detection [J]. Geological Science and Technology Information, 2016, 35(3): 145–150.
- [30] 苑书金, 董宁, 于常青. 地震波衰减技术在鄂尔多斯盆地储层预测中的应用[J]. 石油物探, 2006, 45(2): 182–188.
- Yuan Shujin, Dong Ning, Yu Changqing. The application of seismic attenuation technology for reservoir prediction in Ordos Basin [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2006, 45(2): 182–188.
- [31] 崔龙涛, 张倩萍, 郭诚, 等. 坡折带主控下粗粒三角洲沉积演化及储层预测——以KLA油田为例[J]. 断块油气田, 2019, 26(4): 444–448.
- Cui Longtao, Zhang Qianping, Guo Cheng, et al. Sedimentary evolution of coarse-grained delta and prediction of favorable reservoir under control of slope zone: Taking KLA Oilfield for example [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2019, 26(4): 444–448.
- [32] 彭作磊, 陈铭. 多元地震属性分析提高薄储层预测精度[J]. 断块油气田, 2020, 27(3): 318–322.
- Peng Zuolei, Chen Ming. Multivariate seismic attribute analysis improve prediction accuracy of thin reservoirs [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(3): 318–322.
- [33] 胡云亭, 刘灵童, 王文升, 等. 基于沉积相控的优质储层预测——以鄂尔多斯盆地X区块下石盒子组致密砂岩气为例[J]. 断块油气田, 2020, 27(6): 705–709, 718.
- Hu Yunting, Liu Lingtong, Wang Wensheng, et al. High-quality reservoir prediction based on sedimentary facies control technique: Taking tight sandstone gas of X Block in Lower Shihezi Formation of Ordos Basin as an example [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(6): 705–709, 718.
- [34] 刘妍君, 侯思伟, 王振奇, 等. 密井网下基于AVO三参数地震反演储层预测及应用[J]. 断块油气田, 2020, 27(6): 750–753, 765.
- Liu Yanjun, Hou Siwei, Wang Zhenqi, et al. Reservoir prediction and application based on AVO three-parameter seismic inversion under condition of dense well pattern [J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2020, 27(6): 750–753, 765.
- [35] 王月蕾, 于会臻, 王树华, 等. 反射系数反演方法的改进及其在车排子地区白垩系薄储层预测中的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(1): 128–135.
- Wang Yuelei, Yu Huizhen, Wang Shuhua, et al. Application of improved reflection coefficient inverting method in Chepaizi Cretaceous thin reservoir prediction [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(1): 128–135.
- [36] 岳丽君, 钱艳琴. 基于地震波形指示反演技术的窄薄储层预测[J]. 大庆石油地质与开发, 2020, 39(5): 135–140.
- Yue Lijun, Qian Yanling. Prediction of the narrow-thin reservoir based on seismic waveform indication inversion technology [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(5): 135–140.
- [37] 文瑞霞. 用频率衰减属性预测庆深气田火山岩储层含气性[J]. 天然气工业, 2009, 29(8): 26–28.
- Wen Ruixia. Frequency attenuation for gas potential prediction of the volcanic reservoirs in Qingshen gas field [J]. Natural Gas Industry, 2009, 29(8): 26–28.
- [38] 黄小贞, 谷红陶. 井中微地震监测技术在平桥南页岩气区块应用效果分析[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(1): 43–48.
- Huang Xiaozhen, Gu Hongtao. Microseismic monitoring technology of shale gas block in the southern part of Pingqiao [J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(1): 43–48.
- [39] 王云鹏, 苏芮, 毛传龙, 等. 大城凸起煤层地震频率域含气性预测[J]. 新疆石油地质, 2020, 41(4): 422–429.
- Wang Yunpeng, Su Ri, Mao Chuanlong, et al. Prediction of gas bearing property in seismic frequency domain for coal beds in Dacheng swell [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(4): 422–429.
- [40] 陈芳芳, 姜越, 刘金滚, 等. 地震频谱衰减特征在基岩气藏气井分类评价中的应用——以东坪基岩气藏为例[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(5): 600–604.
- Chen Fangfang, Jiang Yue, Liu Jingun, et al. Application of characteristics of seismic frequency spectrum attenuation in classification and evaluation of gas wells in basement gas reservoirs: A case of Dongping basement gas reservoir [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2019, 40(5): 600–604.
- [41] 毕研斌, 龙胜祥, 郭彤楼, 等. 应用频率衰减属性预测TNB地区储层含气性[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(1): 116–120.
- Bi Yanbin, Long Shengxiang, Guo Tonglou, et al. Prediction of gas distribution with frequency attenuation attribute in TNB area [J]. Oil & Gas geology, 2007, 28(1): 116–120.