

叠前地质统计学反演技术在复杂储层量化预测中的应用

钱玉贵¹,叶泰然²,张世华²,王岩³,詹鑫⁴,殷樱子⁵

(中国石化西南油气分公司勘探开发研究院,四川成都610041)

摘要:地震确定性反演、叠后地质统计学反演是目前致密碎屑岩气藏普遍采用的储层预测技术,但针对复杂岩性结构和复杂波阻抗特征的薄储层,这些反演方法的适应性有限。叠前同时反演与地质统计学反演技术的结合是此类储层量化预测的有效方法,不仅可以提高纵、横向分辨率,还可解决储层与围岩波阻抗叠置情况下有效储层的识别问题。叠前同时反演技术可以得到纵波阻抗体、横波阻抗体、纵横波速度比体和密度体,能够解决复杂波阻抗储层的识别问题,但反演受地震频带限制,纵向分辨率有限。基于随机建模技术的叠前地质统计学反演方法,能有效地综合地质、测井和三维地震数据,极大地提高预测结果的纵、横向分辨率,实现储层的精细描述,在叠前确定性反演的基础上可以更好地识别薄层及薄互层储层,为陆相致密碎屑岩气藏储层描述提供了重要技术支持,在川西新场须四气藏储层预测应用效果明显。

关键词:分辨率;确定性反演;随机模拟;叠前地质统计学反演;复杂储层;储层量化预测

中图分类号:TE122.2 **文献标识码:**A

Application of pre-stack geo-statistics inversion technology in quantitative prediction of complex reservoirs

Qian Yugui¹, Ye Tairan², Zhang Shihua², Wang Yan³, Zhan Xin⁴, Yin Yingzi⁵

(Exploration & Production Research Institute, Southwest Petroleum Company of SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: The deterministic inversion technology and the post-stack geo-statistics inversion technology have been widely adopted in prediction of tight clastic reservoirs. However, they are not very effective in prediction of thin reservoirs with complex lithologic structure and wave impedance. The combination of the simultaneous inversion technology and the pre-stack geo-statistics inversion technology is effectively applied in the quantitative prediction of such reservoirs. The application of these technologies can not only improve the vertical and horizontal resolution but also can recognize effective reservoirs even when the impedances of surrounding rocks and reservoirs are overlapped. Although the pre-stack simultaneous inversion technology can extract P-wave impedance, S-wave impedance, v_p/v_s and density, and can recognize reservoirs with complex impedance, it has limited vertical resolution due to the limitation of frequency band. Stochastic modeling-based pre-stack geo-statistics inversion technology can effectively integrate geological, logging and 3D seismic data, greatly improve both vertical and lateral resolutions, thus can realize fine description of reservoirs. Based on deterministic pre-stack inversion, this technology can effectively identify thin reservoirs and thin interbedded reservoirs. It has been successfully applied to the prediction of reservoirs in the 4th Member of Xujiahe Fm in Xinchang gas field of western Sichuan Basin, a continental tight clastic gas field.

Key words: resolution, deterministic inversion, stochastic simulation, pre-stack geo-statistics inversion, complex reservoir, quantitative prediction of reservoirs

川西新场气田须四下亚段气藏储层为辫状河三角洲沉积,岩性结构复杂,钙质砾岩与孔隙砂岩相互叠置,有效储层主要位于砂岩和砂砾岩互层中,属于致密储层,有效储层薄,波阻抗特征与泥岩叠置严重,地震属性变化同时受到岩性变化和孔隙变化等多重因素影响,属于常规属性分析难以识别的隐蔽储层^[1-3]。岩

性与孔隙的变化复杂,与储层阻抗特征的隐蔽性导致常规波阻抗反演优质储层识别难度大、预测精度极低。利用叠前地震资料,将叠前确定性反演技术和随机反演技术相结合的叠前地质统计学技术^[4-7],不仅解决了储层与围岩阻抗叠置情况下有效储层的识别问题,而且提高了纵向分辨率,解决了薄层识别与储层描述

问题。通过孔隙度乃至含气饱和度协模拟可以得到更加准确的孔隙度体和含气饱和度体,为气藏描述及储量计算提供支撑。在川西新场气田须四下亚段气藏复杂储层描述应用效果明显。

1 基本原理及参数分析

1.1 基本原理

叠前地质统计学反演方法采用严格的马尔科夫链蒙特卡洛算法(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)^[8-9],将叠前同时反演和随机反演技术相结合,成为一个全新的同时 AVA 随机反演算法。在叠前地质统计学反演工作中,通过将地震和岩相、测井曲线、概率分布函数、变差函数等信息相结合,定义严格的概率分布模型,通过对井资料和地质信息的分析后获得概率分布函数和变差函数,然后从井点出发,井间遵从原始地震数据,通过随机模拟产生井间波阻抗,再将波阻抗转换成反射系数并与确定性反演方法求得的子波进行褶积产生合成地震道,通过反复迭代直至合成地震道与原始地震道达到一定程度的匹配^[10]。所以岩性模拟的样点产生过程并不是完全“随机”的,因为叠前地质统计学反演中要求在引入高频数据信息的同时,每次岩性模拟所对应的合成地震记录必须和实际的地震数据有很高的相似性。

叠前地质统计学反演以地质统计学分析为基础,主要包括随机模拟过程和反演过程。通过对地震和测井数据进行统计分析,求取变差函数,选择合适的随机模拟算法和反演算法,得到高分辨率的数据体^[11]。当然在提高纵向分辨率的同时也会引入误差,通过应用多次的等概率模拟,可以得到多个与井资料、地质信息,地震资料相吻合模拟结果,基于多个模拟实现可以

求取最大似然岩性体、属性体,是目前解决横向非均质性很强的岩性油气藏描述问题的最佳方案。

1.2 统计学参数分析

叠前地质统计学反演的参数分析主要指概率分布函数(probability density function)和变差函数(variation function)。其中概率分布函数描述的是特定岩性对应的岩石物理参数在空间的概率分布情况,对于序贯高斯模拟要求数据服从高斯分布,因此模拟前应对数据进行分析,若不服从高斯分布,需要进行数据转换^[10]。而变差函数描述的是横向和纵向地质特征的结构和特征尺度,是地质统计学中描述区域化变量空间结构性和随机性的基本工具。地质统计学反演中垂向变差函数从井数据求取,水平方向变差函数往往受到钻井密度的限制,不应该直接从对井的分析中得到,目前比较常用的方法主要有:①根据已经建立的地质信息库信息,结合研究区的沉积环境特征,地震属性分析,定性确定不同沉积环境下沉积体的变程(变差函数);②根据确定性反演结果定量地确定变量在水平方向上的变程^[11-14]。

2 应用实例

2.1 储层基本特征

新场气田须家和组四段下亚段(须四下亚段)主要为辫状河三角洲沉积环境^[15],沉积相变快,北部以砾岩为主,向南逐渐过渡为砂砾岩、砂岩(图 1),岩性结构极为复杂。从钻井取心资料分析得出:须四下亚段储层孔隙度值分布较散,孔隙度平均值 5.2%,中值 5.01%,主要分布在 5% ~ 6%;储层渗透率平均值

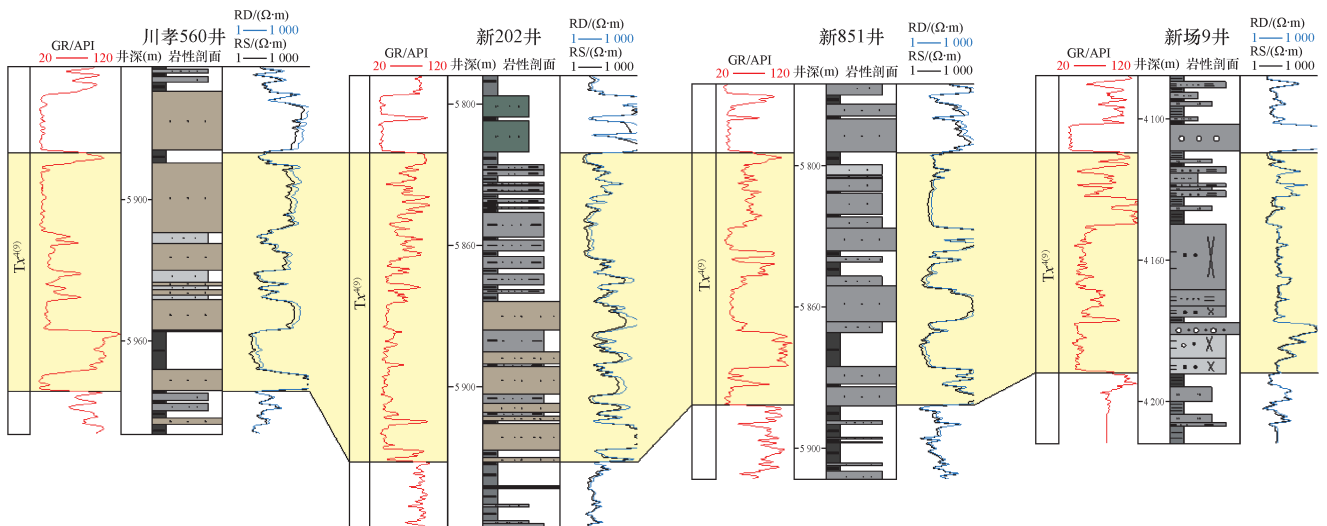


图 1 四川盆地新场地区须四段 Tx⁴⁽⁹⁾砂组连井对比剖面

Fig. 1 Well-tied profile of sand group Tx⁴⁽⁹⁾ of 4th Member of Xujiahe Formation in Xinchang area, the Sichuan Basin

$0.67 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 中值 $0.077 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 且主要分布在 $0.08 \times 10^{-3} \sim 0.16 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, $0.04 \times 10^{-3} \sim 0.08 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 和 $0.16 \times 10^{-3} \sim 0.32 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 3 个区间中, 储层孔-渗关系差, 非均质性强, 储集类型有孔隙型、裂缝-孔隙型和裂缝型 3 种^[16], 储层岩性为砂岩、砂砾岩, 围岩除泥岩外, 还有北部普遍分布的砾岩, 砾岩主要为钙质胶结, 平均孔隙度 3% 以下, 为非储层。

总体上看须四下亚段储层具有岩性复杂, 岩相变化快, 物性差, 非均质性强, 储层类型多样等特点, 气藏分布主要受沉积相带控制^[17], 相对高孔隙度砂岩、砂砾岩储层是地震预测的主要目标。

2.2 敏感参数分析及反演方法选择

前期钻井证实, 储层的岩性组合与天然气的高产富集有一定关系, 所以, 首先必须有效的区分储层的岩性。从钻井的实测资料研究表明, 纵横波速度比是个对岩性非常敏感的岩石弹性参数^[18-20], 对于钙质含量低的砂岩和泥岩, 纵、横波速度比和泥质含量有很好的相关关系。对须四段的地层进行分岩性的统计, 从弹性参数的统计结果可以看出: 须四段的砂岩总体而言纵波速度略大于泥岩, 钙质的纵波速度最高; 在纵波阻抗上, 砂岩和泥岩的叠置非常严重, 高钙含量的岩石纵波阻抗相对高于砂岩和泥岩。砂岩和泥岩在横波速度上的差别比纵波速度大一些, 但横波阻抗的叠置仍然很严重。在纵、横波速度比上, 相对可以比较容易的识别砂岩和泥岩, 但钙质和泥岩的纵、横波速度比存在严重叠置(图 2)。

针对该区储层特点, 单一运用波阻抗是很难区分开储层与非储层, 即叠后反演技术在本区须四储层预测很难凑效, 因此, 必须采用储层叠前反演技术才能有效的把储层与围岩区分开。

2.3 叠前同时反演与地质统计学反演

由于叠前地质统计学反演虽然可提高纵向分辨率, 但是横向分辨率主要来源于地震, 所以在做叠前地质统计学反演之前, 必须首先完成一个高质量的叠前确定性反演, 这一步的目的是为地质统计学反演提供约束, 包括理想的井震标定, 合理的子波估算, 准确的模型建立等。同时确定性反演结果可以进行砂体的粗略雕刻, 从而对目标区的岩性展布、岩性比例有一个总体上正确的把握, 这些认识都是地质统计学的初始输入; 确定性反演结果也是地质统计学反演结果横向预测准确度的参照物, 可以用来对统计学反演结果进行质量控制。

2.3.1 叠前同时反演(确定性反演)

AVO 叠前同时反演得到了地震分辨率下精确的岩石弹性参数数据体, 在测井资料的约束下对不同角度或者偏移距部分叠加后的多个地震数据体同时进行反演, 生成纵波阻抗、横波阻抗、纵横波速度比等数据体(图 3), 用于对叠前地质统计学反演的质量控制。AVO 叠前同时反演涉及的主要步骤有: ①地震子波提取; ②根据地质模型建立纵波阻抗、纵横波速度比和密度的低频约束模型; ③部分叠加数据体的 AVO/AVA 约束稀疏脉冲同时反演。

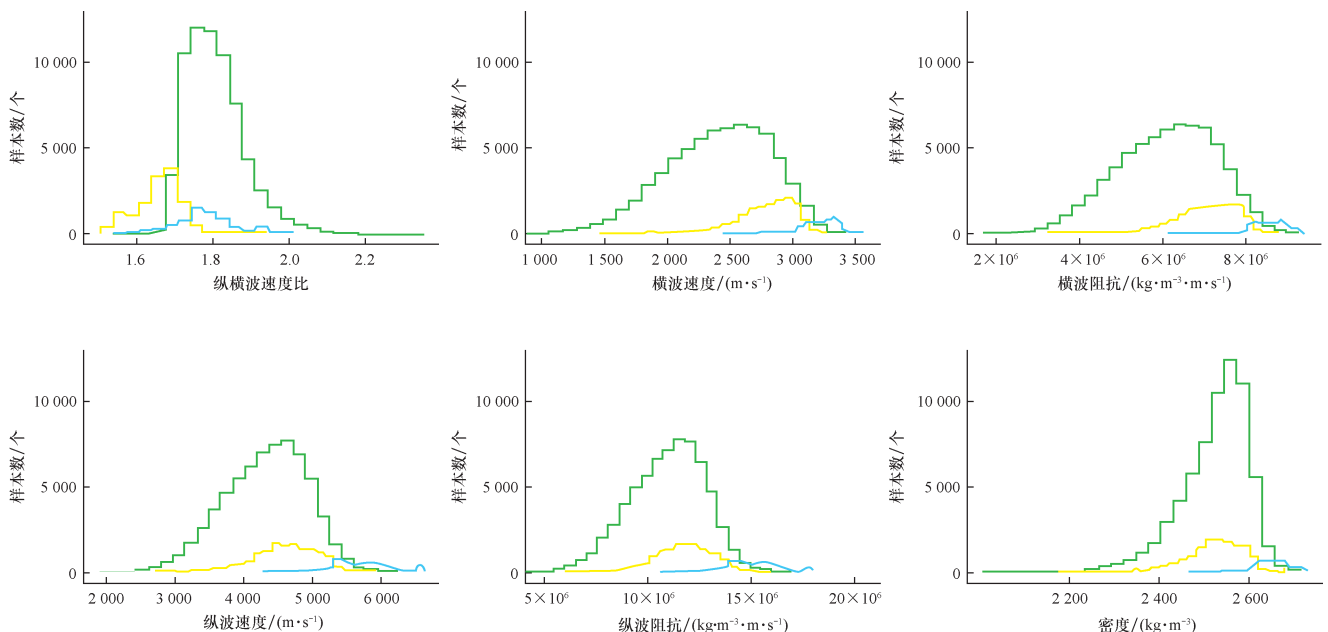


图 2 四川盆地新场地区须四段岩石弹性参数分岩性统计结果

Fig. 2 Elastic parameter statistics of rocks with different lithologies in the 4th Member of Xujiache Formation in Xinchang area, the Sichuan Basin

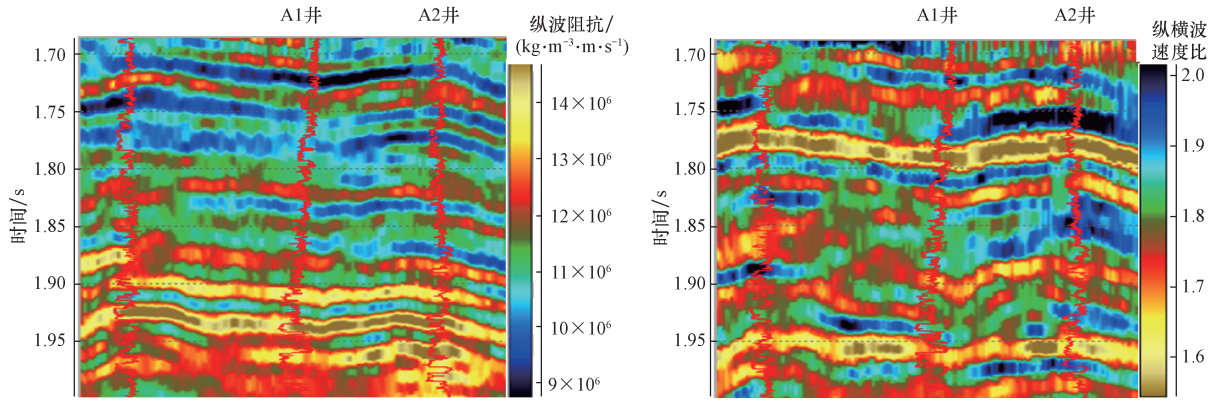


图 3 四川盆地新场地区叠前确定性反演联井剖面

Fig. 3 Well-tied profile of pre-stack deterministic inversion in Xinchang area, the Sichuan Basin

2.3.2 叠前地质统计学反演参数分析

叠前地质统计学反演参数可以通过对工区内钻井的分析得到。对新场地区 15 口测井曲线质量好的井进行分析,阻抗概率分布严格服从高斯分布,中值为 $11.49\ 52 \times 10^6\ \text{kg} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$,方差为 $1.478\ 611\ (\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1})^2$;变差函数的求取来自于井震拟合,在拟合的过程中需要确定 3 个方向的变程(纵向、横向之东西向、横向之南北向),由于纵向样本点较多,拟合的纵向变程比较落实,通过对高斯型和指数型拟合的比较,本地区指数型拟合较好,纵向变程为 6 m;而其余两个水平方向的变程往往由于横向采样数据点不足,研究中是通过对地质沉积规律的认识来确定,可以通过测试稳定分布泥岩或煤层反演结果确定变程参数。

2.3.3 叠前地质统计学反演实现

研究采用 Jason 软件中 RockMod 模块进行地质统计学反演,根据须四段的实际地质情况,结合测井地层评价的结果,将新场须四下亚段岩性分成砾岩、砂岩、泥岩 3 种类型。其中,砂岩、泥岩的纵、横波速度比和泥质含量有很好的统计学关系,砾岩和砂岩的阻抗有

很好的统计关系,这样就可以用纵波阻抗和纵、横波速度比来识别和模拟以上岩性。为了减小单次模拟造成的统计学涨落误差,进行了 20 次岩性模拟,然后对 20 次实现的岩性概率体和属性概率体进行统计计算,得到阻抗体和纵、横波速度比体(图 4)以及最大似然岩性体(图 5)。从岩性剖面中可以看出各种岩性能直观地展现出来,砂体横向变化较清晰且与井实钻结果吻合较好。

基于高分辨率岩性模拟的结果和岩石弹性参数体,可以通过多轴高斯协模拟的数学方法,对砂岩的孔隙度进行协模拟。根据测井分析结果(图 6),优质储层主要位于低波阻抗区域,储层孔隙度和纵波阻抗之间有较高的相关系数,这也意味着使用协模拟的方法可以得到准确的孔隙度体(图 7)。

2.3.4 叠前地质统计学反演效果分析

叠前地质统计学反演可以得到了多个同井完全吻合且在空间上符合同步反演结果的岩性实现,最终通过多次地质统计学的岩性概率实现来综合计算得到最终的极大似然岩性体。通过在反演的岩性体上进行各砂体顶面的精细解释,沿各砂组顶底的砂岩厚度累积积分得到须四段内各描述单元的砂岩厚度平面分布,

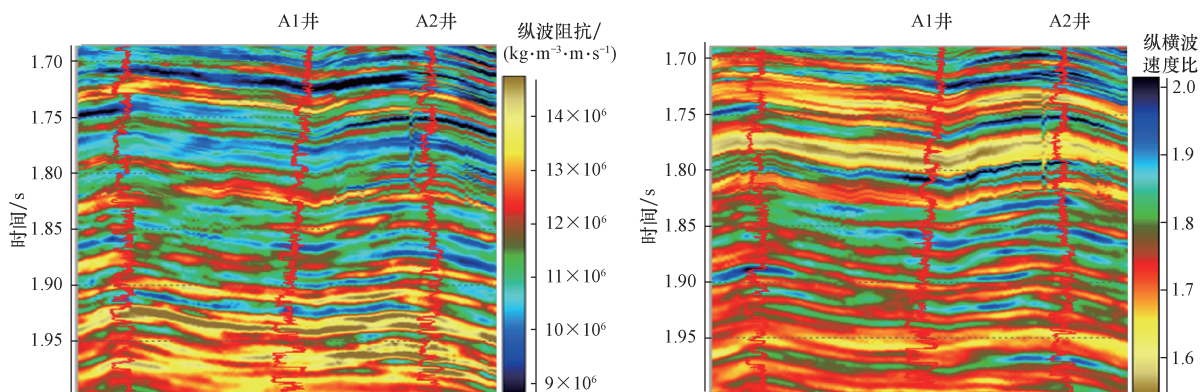


图 4 四川盆地新场地区叠前地质统计学反演联井剖面

Fig. 4 Well-tied profile of pre-stack geo-stastics inversion in Xinchang area, the Sichuan Basin

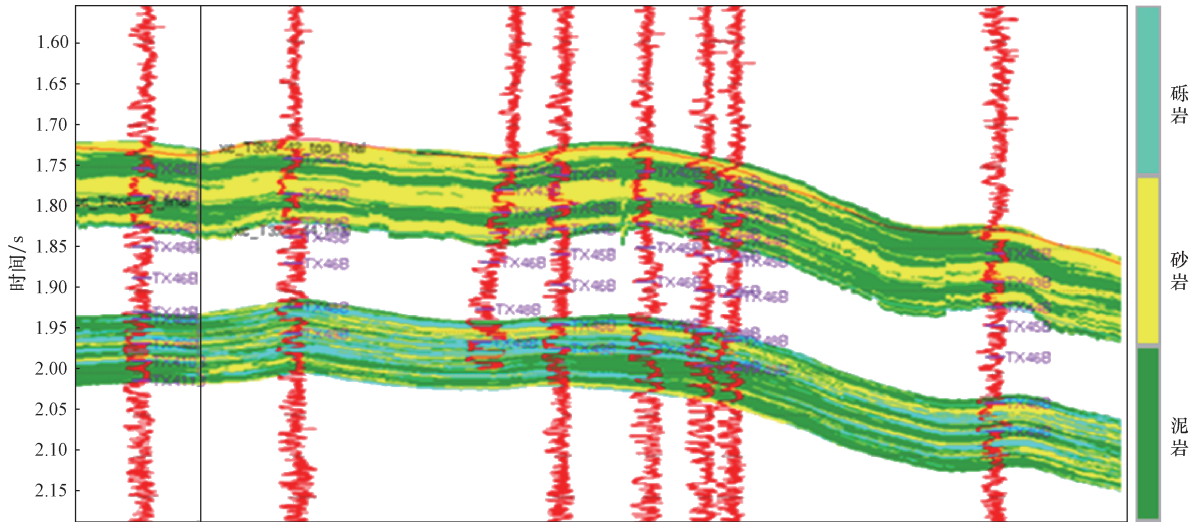


图5 四川盆地新场地区叠前地质统计学反演极大似然岩性剖面

Fig. 5 Well-tied profile of pre-stack geostatistical inversion with maximum likelihood in Xinchang area, the Sichuan Basin

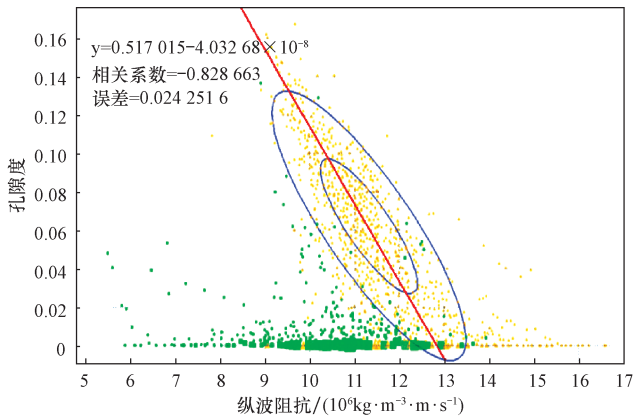


图6 四川盆地新场地区须四段砂岩孔隙度和纵波阻抗交会图
Fig. 6 Porosity and P-wave impedance crossplot of the 4th Member of Xujiache sandstone in Xinchang area, the Sichuan Basin

以 $Tx^{4(9)}$ 砂组为例(图8)。在反演岩性体的基础上,给定孔隙度门槛值,可以得到不同孔隙度储层厚度的平

面分布(图9),还可以得到大于特定孔隙度值的某类型储层中,平均孔隙度值以圈定优质储层,识别甜点。因此,通过地质统计学反演得到的这些结果,不仅可以直接用于沉积相图的编制、储层描述、合乎储量计算的气藏描述,也可为勘探开发井位的部署提供依据。

3 结论

1) 致密气藏储层往往具有储层薄、极强的横向非均质性,常规属性分析难以解决储层识别和量化预测问题。

2) 叠前地质统计学能有效地综合地质、测井、地震资料,它将地震横向分辨率和测井纵向分辨率有机结合,不仅有助于解决了薄层识别问题,还在识别困扰地球物理储层预测多年的波阻抗与围岩叠置的隐蔽储层方面取得重要进展。

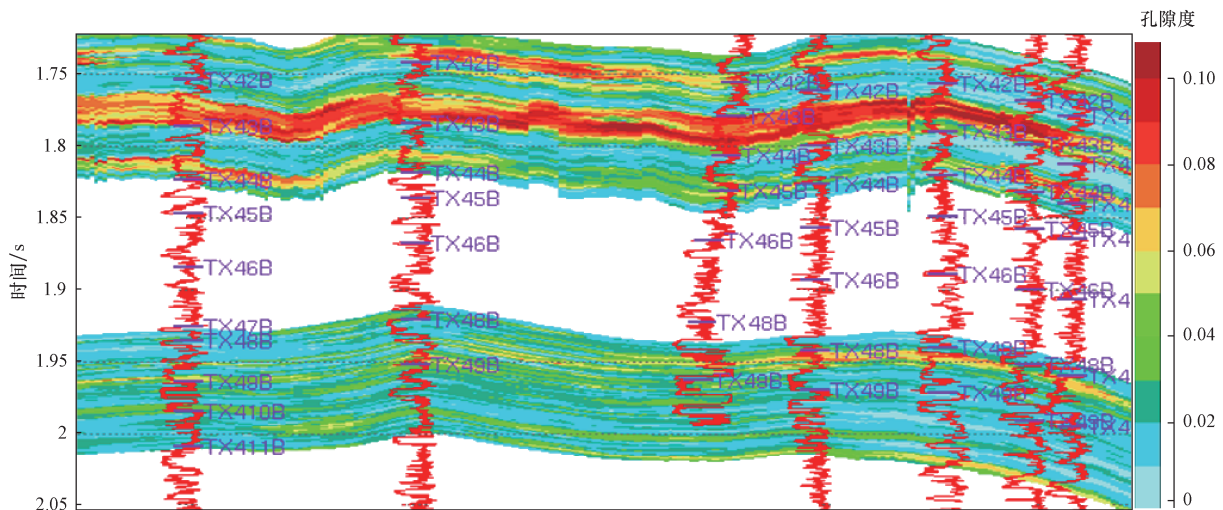


图7 四川盆地新场地区协模拟孔隙度联井剖面

Fig. 7 Well-tied profile of simulated porosity of Xinchang area, the Sichuan Basin

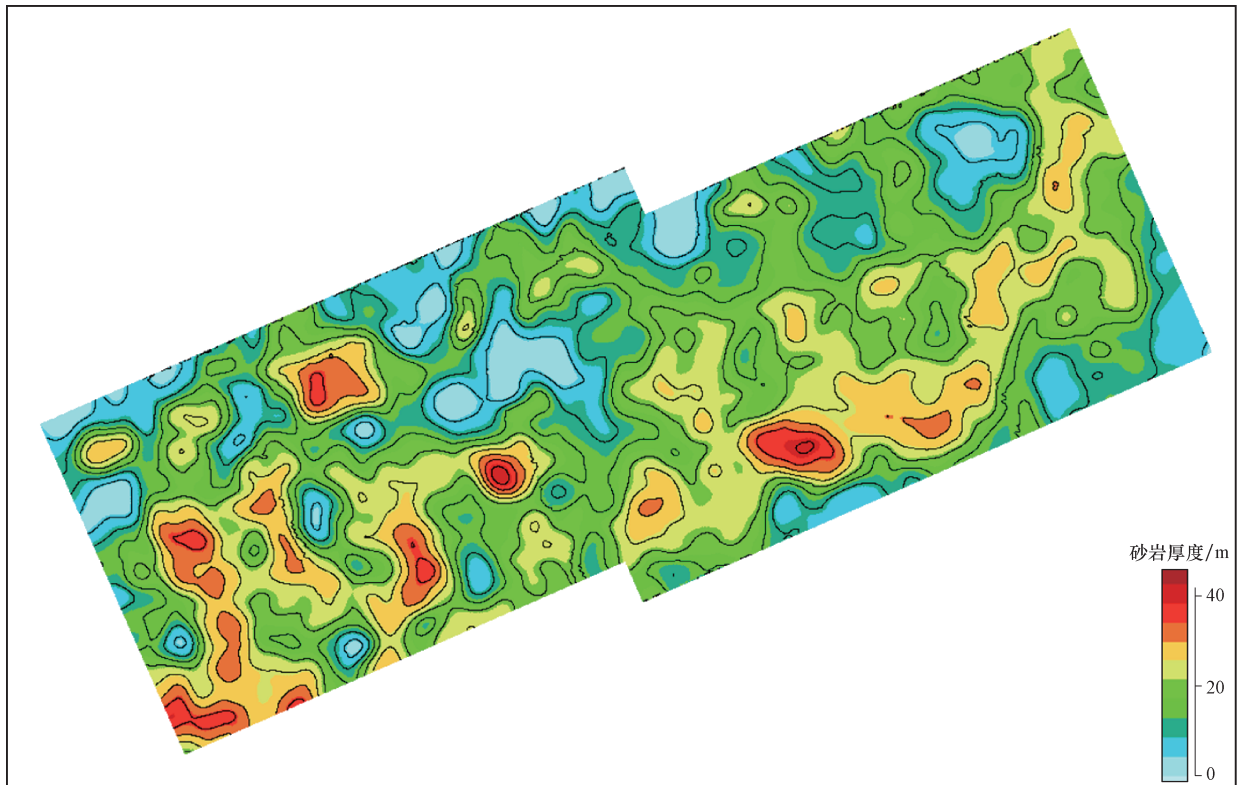


图 8 四川盆地新场地区须四段 $Tx^{4(9)}$ 砂组砂岩厚度

Fig. 8 Isopach of $Tx^{4(9)}$ sandstone of the 4th Member of Xujiache Formation in Xinchang area, the Sichuan Basin

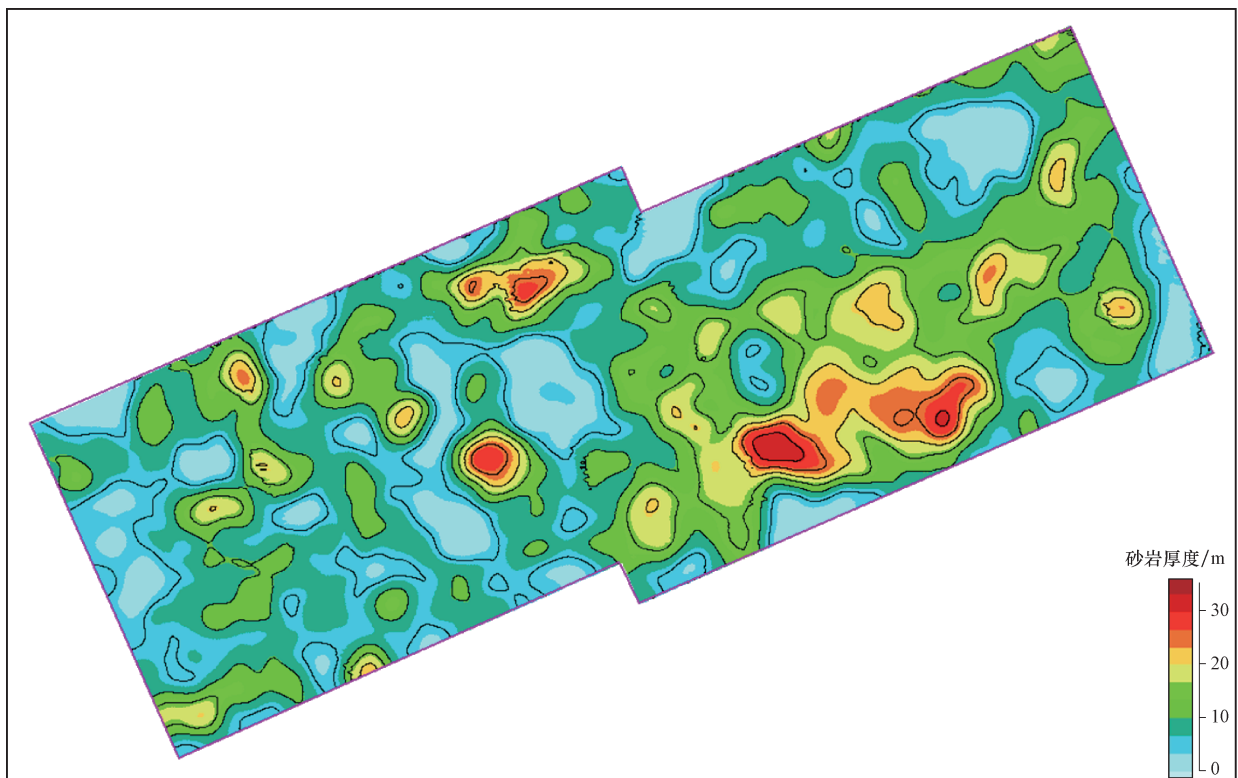


图 9 四川盆地新场地区须四段 $Tx^{4(9)}$ 砂组有效砂岩厚度(孔隙度 > 6.5%)

Fig. 9 Isopach of effective sandstone in $Tx^{4(9)}$ of the 4th Member of Xujiache Formation in Xinchang area, the Sichuan Basin (with porosity over 6.5%)

3) 地质统计学反演是近年来气藏描述储层量化预测的技术进展亮点,伴随方法完善和技术进步、多波采集工业化等进程,P波叠前地质统计学反演、多波属

性联合地质统计学反演等将逐渐成为现实,因此,该技术具有更加广阔的发展空间,可望在气藏描述中发挥越来越大的作用。

参 考 文 献

- [1] 伊万顺,陈绪清,徐海,等.叠前道集地层约束反演技术在砂砾岩储层预测中的应用[J].大庆石油学院学报,2009,33(2):27-30.
Yi Wanshun, Chen Xuqing, Xu Hai, et al. Application of pre-stack constrained stratigraphic inversion technique in reservoir prediction of glutenite[J]. Journal of Daqing Petroleum Institute, 2009, 33(2): 27-30.
- [2] 刘百红,李建华,魏小东,等.随机反演在储层预测中的应用[J].地球物理学进展,2009,24(2):581-589.
Liu Baihong, Li Jianhua, Wei Xiaodong, et al. The application of Stochastic seismic inversion in reservoir prediction[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(2): 581-589.
- [3] 王琦,李红梅.开发地震在大庆长垣喇嘛甸油田储层预测中的应用[J].石油与天然气地质,2012,33(3):490-496.
Wang Qi, Li Hongmei. Application of development seismology to reservoir prediction of Lamadian oilfield in Daqing placanticline[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(3): 490-496.
- [4] Haas A, Dubrule O. Geostatistical inversion—a sequential method for stochastic reservoir modeling constrained by seismic data[J]. First Break, 1994, 13(12): 25-29.
- [5] Dubrule O, Thibaut M, Lamy P, et al. Geostatistical reservoir characterization constrained by 3D seismic data[J]. Petroleum Science, 1998, 4(2): 121-128.
- [6] Rothman D H. Geostatistical inversion of 3D seismic data for thinsand delineation[J]. Geophysics, 1998, 51(2): 332-346.
- [7] 王香文,刘红,滕彬彬,等.地质统计学反演技术在薄储层预测中的应用[J].石油与天然气地质,2012,33(5):730-735.
Wang Xiangwen, Liu Hong, Teng Binbin, et al. Application of geostatistical inversion to thin reservoir prediction[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(5): 730-735.
- [8] 赵林.马尔可夫链蒙特卡罗模拟在储层反演中的应用[J].石油天然气学报,2009,31(2):249-252.
Zhao Lin. Application of Monte Carlo simulation of Markov Chain in seismic inversion [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2009, 31(2): 249-252.
- [9] 刘文波,汪益宁,滕蔓,等.反演技术在喇嘛甸油田储层预测中的应用[J].石油天然气学报,2011,33(12):63-67.
Liu Wenbo, Wang Yining, Teng Man, et al. Application of seismic inversion for reservoir prediction of Lamadian oilfield[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(12): 63-67.
- [10] 孙思敏,彭仕宓.地质统计学反演方法及其在薄层砂体预测中的应用[J].西安石油大学学报,2007,22(1):41-48.
Chen Simin, Peng Shimi. Geostatistical inversion method and its application in the prediction of thin reservoirs[J]. Journal of Xian Shiyou University, 2007, 22(1): 41-48.
- [11] 何火华,李少华,杜家元,等.利用地质统计学反演进行薄砂体储层预测[J].物探与化探,2011,35(6):804-808.
He Huohua, Li Shaohua, Du Jiayuan, et al. The application of geostatistical inversion method to prediction the thinsandstone reservoir[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(6): 804-808.
- [12] 潘昱洁,李大卫,杨镭.确定性反演和随机反演对井约束条件的需求分析[J].石油物探,2011,50(4):345-350.
Pan Yujie, Li Dawei, Yang Kai. A comparison between the requirements of multi-well constrained conditions in deterministic inversion and stochastic inversion[J]. Geophysical Prospecting For Petroleum, 2011, 50(4): 345-350.
- [13] 孙思敏,彭仕宓.地质统计学反演及其在吉林扶余油田储层预测中的应用[J].物探与化探,2007,31(1):51-54.
Sun Simin, Peng Shimi. Geostatistical inversion metyod and its application to reservoir prediction of Fuyu oilfield in Jilin province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 31(1): 51-54.
- [14] 韩瓣,臧殿光,李建华.地质统计学反演在四川盆地L地区储层预测中的应用[J].物探化探计算技术,2010,32(3):310-315.
Han Ban, Zang Dianguang, Li Jianhua. The application of geostatistical inversion to reservoir prediction of L area in Sichuan basin[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2010, 32(3): 310-315.
- [15] 颜学梅,张哨楠,苏锦义. AVO 叠前反演在中等阻抗储层预测中的应用[J].物探化探计算技术,2012,34(1):51-57.
Yan Xuemei, Zhang Shaonan, Su Jinyi. The application of AVO Pre-Stack inversion technique to predict the reservoir with medium impedance[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 34(1): 51-57.
- [16] 张世华,叶泰然,钱玉贵,等.新场构造须家河组四段气藏描述[R].中国石化西南油气分公司勘探开发研究院,2011.
Zhang Shihua, Ye Tairan, Qian Yugui, et al. The description of the gas reservoir in the fourth member of Xujiahe Formation in Xinchang Structure[R]. Exploration & Production Research Institute, SWPB, 2011.
- [17] 张玺华,陈洪德,侯明才,等.四川盆地西部新场地区须家河组四段9砂组地震沉积学[J].石油与天然气地质,2013,34(1):95-101.
Zhang Xihua, Chen Hongde, Hou Mingcai, et al. Seismic sedimentology of the 9th sand group in the 4th member of the Triassic Xujiahe Formation in Xinchang area of the western Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(1): 95-101.
- [18] 明治良,陈丰,赵皓,等.孝泉-新场地区须家河组地震储层预测及流体检测[R].辉固地球科技有限公司,2009.
Ming Zhiling, Chen Feng, Zhao Hao, et al. Xiaquan-Xinchang area of Xujiahe reservoir prediction and hydrocarbon detection[R]. Fugro-Jason China, 2009.
- [19] 李宗杰.正演模拟验证叠前弹性阻抗反演在碳酸盐储层预测中的应用[J].石油物探,2013,52(3):323-328.
Li Zongjie. Application of prestack elastic impedance inversion in carbonate reservoirs prediction on forward modeling[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(3): 323-328.
- [20] 王有涛,陈学国,郝志伟,等.高分辨率反演在春风油田储层预测中的应用[J].断块油气田,2013,20(3):293-295.
Wang Youtao, Chen Xueguo, Hao Zhiwei, et al. Application of high-resolution seismic inversion in reservoir prediction of Chunfeng Oilfield[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2013, 20(3): 293-295.

(编辑 高岩)