

引用格式: 赖未蓉, 杨国鹏, 宋沛东, 等. 相控叠前地质统计学反演在储层预测中的应用——以四川盆地川西坳陷须家河组二段致密砂岩储层为例[J]. 油气藏评价与开发, 2024, 14(4): 586–592.

LAI Weirong, YANG Guopeng, SONG Peidong, et al. Application of facies-controlled prestack geostatistical inversion in reservoir prediction: A case study of tight sandstone reservoir in the second member of Xujiahe Formation in western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2024, 14(4): 586–592.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2024.04.008

相控叠前地质统计学反演在储层预测中的应用

——以四川盆地川西坳陷须家河组二段致密砂岩储层为例

赖未蓉, 杨国鹏, 宋沛东, 章顺利, 王 铮

(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: 四川盆地川西坳陷新场构造带高庙子气田须家河组二段致密砂岩气藏多套砂体叠置, 相变明显, 表现为“整体富砂、局部含气”的特征, 但有效储层发育段与泥岩的阻抗相当, 常规叠后反演方法难以准确预测砂体边界及优质储层分布。在须二段地质特征研究基础上, 首先开展有利相带边界识别及预测研究, 并结合岩石物理敏感参数分析, 开展相控约束下叠前地质统计学反演研究, 实现对有效储层与泥岩层劈分, 进而完成了相控有效储层预测。预测结果不仅提高了砂体识别精度, 同时也提高了有效储层预测的可靠性, 预测结果与实际钻井吻合度较高。该预测技术有效支撑了合兴场气田储量提交和探井井位部署, 已产生了一定的油气效益。

关键词: 致密砂岩; 地震相; 敏感参数; 叠前地质统计学反演; 有效储层预测

中图分类号: TE122

文献标识码: A

Application of facies-controlled prestack geostatistical inversion in reservoir prediction: A case study of tight sandstone reservoir in the second member of Xujiahe Formation in western Sichuan Depression, Sichuan Basin

LAI Weirong, YANG Guopeng, SONG Peidong, ZHANG Shunli, WANG Zheng

(Research Institute of Exploration and Development, Sinopec Southwest China Oil & Gas Company, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: The second member of Xujiahe Formation in Gaomiaozi Gas Field, located in Xinchang fault zone of western Sichuan Depression, Sichuan Basin, is a typical tight sandstone gas reservoir with multiple layers of superimposed sand bodies. The sand bodies exhibit clear transverse phase transitions, characterized as “overall sand rich, locally gas rich”. However, due to the impedance of the high-quality reservoir being similar to that of mudstone, traditional post-stack inversion methods struggle to accurately delineate the boundaries of the sand body and the distribution of high-quality reservoir zones. To address these challenges, the study initially focused on identifying and predicting the boundary of the favorable facies zones based on the geological characteristics of the second member of Xujiahe Formation. This was complemented by an analysis of sensitive petrophysical parameters. Subsequently, a pre-stack geostatistical inversion study was conducted under phase control constraints. This approach enabled the differentiation between effective reservoirs and mudstone, culminating in an accurate prediction of phase-controlled effective reservoirs. The results of this predictive technology not only enhanced the accuracy of identifying sand bodies but also improved the reliability of predicting effective reservoirs. The outcomes closely matched the actual drilling results. This prediction technology has significantly supported the reserve submission and the strategic deployment of exploration well locations in the Hexingchang gas field, yielding substantial oil and gas benefits.

Keywords: tight sandstone; seismic facies; sensitive parameter; prestack geostatistical inversion; effective reservoir prediction

新场构造带位于四川盆地川西坳陷中段, 为大型隆起构造带, 是川西最主要的天然气聚集带之一^[1]。在整个

新场构造带须家河组二段(以下简称须二段)中, 已钻井显示须二段致密砂岩气藏为多套砂体叠置, 相变明显, 表

收稿日期: 2023-05-15。

第一作者简介: 赖未蓉(1981—), 女, 硕士, 工程师, 从事地震资料综合研究解释与储层精细预测工作。地址: 四川省成都市高新区吉泰路688号中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 邮政编码: 610041。E-mail: laiweirong.xnyq@sinopec.com

基金项目: 中国石化重大科技项目“中国石化油气资源评价关键技术研究与应用”(P23221)。

现为“整体富砂、局部含气”的特征^[2]。须二段预测储层的难题在于砂体和薄围岩之间的阻抗差异较小,较薄的有效储层发育段和致密砂岩段的阻抗差异较小。这就导致常规叠后反演方法难以准确预测砂体边界及有效储层分布。

针对储层和盖层阻抗出现叠置的情况,有些学者在早期研究中提出采用电阻率^[3]、自然伽马^[4]等可以区分储层盖层的曲线来与弹性参数建立关系,然后以电性曲线、放射性曲线代替声波曲线,但电性、放射性参数与弹性参数之间的物理机制存在着不明确性。近年来,国内外针对致密砂岩围绕叠前反演技术方法开展了大量的研究,并已经取得了重大进展。GONZÁLEZ等^[5]将多点地质统计学方法和岩石物理模型与确定性优化算法相结合;BORDIGNON等^[6]提出了贝叶斯线性化地震反演和迭代地质统计学地震反演相结合的混合地震反演;YANG等^[7]提出了基于混合反演储层参数协同模拟和逐步变形法反演模式;钱玉贵等^[8]利用叠前地质统计学反演成功预测了川西新场气田须家河组四段(以下简称须四段)下亚段气藏储层;叶艳等^[9]利用地质统计学反演实现了川西地区什邡气田侏罗系气藏储层预测;何火华等^[10]利用地质统计学反演成功预测了三角洲前缘薄储层;伍新和等^[11]利用地震波形分析技术实现了川西坳陷须四段地震相的识别;张国华等^[12]在高精度层序地层格架的基础上构建相控模型,然后利用相控模型约束地质统计学反演,成功实现了西湖凹陷平湖组储层预测。

前期地质研究表明:川西坳陷须家河组二段致密砂岩气藏多套砂体叠置,相变明显,砂体横向展布具有强烈的非均质性,单纯利用地质统计学反演难以精确预测砂体展布特征。因此,在须二段地质特征研究与已钻井测井相分析的基础上首先开展有利相带边界识别及预测,并结合岩石物理敏感参数分析,开展相控约束下叠前地质统计学反演研究,实现对有效储层与泥岩层劈分,进而完成了相控有效储层预测。

1 基本原理及参数分析

叠前地质统计学反演是基于贝叶斯预测框架,采用严格的马尔科夫链蒙特卡罗算法,利用后验概率采样获得最大后验概率来实现对储层的有效预测,后验概率表示为:

$$P(h|D) = \frac{P(D|h)P(h)}{P(D)} \quad (1)$$

式中: h 为反演的目标,可以为离散的岩性数据或弹性数据,如纵波阻抗; D 为用于反演的地震数据或岩性预测; $P(h)$ 为是反演目标的先验概率,即岩性模型中的岩性比

例或弹性参数模型的PDF(概率密度函数)^[13]; $P(D|h)$ 为条件概率,即岩性预测结果同岩性约束或弹性数据正演地震与实际地震的最大似然概率; $P(D)$ 为地震数据的概率或约束岩性的概率,对后验概率影响有限。

马尔科夫链蒙特卡罗算法,首先基于实际概率分布得到统计意义上正确随机样点分布,在此基础上,通过变化梯度法等优化算法,增量调整方式,实现全局优化求解。马尔科夫链蒙特卡罗算法由于同时考虑了地震和地质统计信息,计算过程更加严格。最终获得反演结果的过程即对后验概率采样,并获得最大概率^[14-15]。

当岩性弹性参数统计分布叠置严重时,地震的约束作用进一步减弱导致地震数据失去对沉积趋势的指导作用。在这种情况下,需要将沉积相与沉积模式的研究成果作用约束加入到地质统计学反演中,弥补地震约束作用的不足。针对研究区须二上亚段第一套砂岩横向变化大的特点,确定相控地质统计学反演流程:①建立地层对比格架;②基于地震波形特征的地震相分析;③确定砂岩发育边界;④将该砂体边界作为反演约束条件建立反演所需低频模型;⑤开展地质统计学反演;⑥反演结果分析与应用。

2 应用实例

2.1 储层基本特征

研究工区新场构造带须二上亚段发育3套砂组。XQ-XC地区第一套砂组砂体不发育,向东至HXC地区G井附近砂体开始发育,继续往东至FG地区稳定分布。区内第一套砂组与下伏的第二套砂组之间发育15~30 m厚度的稳定泥岩,能有效分隔第一套砂组与第二套砂组。整个XQ-XC-HXC-FG构造带第二套砂组和第三套砂组砂体均稳定发育,且在XC气田西部第二套砂体和第三套砂体间发育稳定泥岩。该套泥岩自西向东逐渐变薄,至HXC地区该泥岩隔层减薄至3~10 m。

须二上亚段储层具有多套砂体叠置、砂体横向相变明显性差等特点^[16],岩性边界刻画、岩性识别与有效储层识别是地震预测的主要目标。

2.2 基于地震波形特征的地震相分析

结合岩心观察与测井相特征分析等综合研究,认为XQ-XC-HXC-FG构造带须二上亚段沉积微相主要发育有水下分流河道、水下分流间湾和滨浅湖沉积等。HXC地区的G井第一套砂组测井曲线表现为箱形特征,为典型的水下分流河道沉积,砂组顶面地震反射表现为强波峰;XC地区的F井第一套砂组测井曲线表现为锯齿状特征,为典型的分流间湾沉积,砂组顶面地震反射表现为弱

波谷;而位于XQ地区的A井第一套砂组测井曲线表现为指状特征,为典型的滨浅湖沉积,砂组顶面地震反射表现为波谷。第一套砂组在工区东、西两侧地震响应特征差异明显(图1)。图2是结合已钻井测井相特征,根据地震反射波形^[17]提取的须二上亚段第一套砂组的波形聚类属性^[18],可见不同的沉积微相分异特征明显,边界比较清楚。对于整个新场构造带而言,西部XQ、XC地区(图2中蓝色、绿色区域)主要是分流间湾和滨浅湖偏泥质沉积,地震剖面表现为弱波谷反射特征。在HXC地区有个从泥岩沉积向砂岩沉积的转换带,转换带东部的HXC—FG地区(图2中黄色线)主要为水下分流河道砂岩沉积,地震剖面表现为强波峰反射特征。通过地震相分析可以确定第一套砂体边界,在后续地质统计学反演所需的低频模型建立中可以将该砂体边界作为反演约束条件^[19-20]。

2.3 敏感参数分析及反演方法选择

以伽马曲线为岩性指示,通过伽马与多种弹性参数交会分析可知,密度、纵波速度及低阻抗对特大套的中高阻抗砂岩和低阻抗泥岩有一定的识别能力,但中等阻抗的砂岩和泥岩密度、纵波速度则叠置严重,横波速度和纵横波速度比对中等阻抗的砂、泥岩岩性的识别效果较好,而致密砂岩中的有效储层一般也表现为中等阻抗。因此,针对新场构造带GMZ气田须二上亚段岩性与有效储层识别,单一运用叠后波阻抗很难区分有效储层和泥岩,必须采用叠前地质统计学反演技术才能有效把中等阻抗的砂岩与围岩区分开。图3是加入地震相预测砂体边界约束后的相控叠前地质统计学反演流程图^[21]。依据已钻井须二上亚段敏感参数分析,优选反演出纵横波速度比来开展岩性识别和有效储层预测^[22]。

2.4 相控叠前地质统计学反演结果分析与应用

在地质统计学反演中,通过将地震岩性体、测井曲线、概率密度函数及变差函数等信息相结合,定义严格的概率分布模型。首先,通过对测井资料的分析 and 地质信息获得概率密度函数和变差函数;其次,马尔科夫链蒙特卡罗算法根据概率分布函数获得统计意义上正确的样点集,即根据概率分布函数能够得到各种类型的结果。地质统计学反演结果是以明确在合适位置处具有尖锐边缘的岩性体和更多的细节来重现真实的油藏。因此,地质统计学反演提供了大量超过地震数据带宽的细节内容,能很好地解决常规叠后确定性反演的高频缺失问题,即纵向分辨率高于地震分辨率。反演结果阻抗剖面不仅在纵向分辨率上有明显提高,而且横向变化与确定性反演保持一致,特别是对致密砂岩中有效储层的识别精度显著提高。从图4a、图4b的对比中可以看出,对CC井、DD井须二段第一套砂组中有效储层段的识别,叠前地质统计学反演的精度明显提高。对工区内已钻井提取须二段不同反演方法所得到的阻抗曲线与已钻井阻抗测井曲线对比,叠前地质统计学反演结果在分辨率与吻合度上均明显优于常规叠后反演结果^[23]。而相控地质统计学反演能够在地质统计学模型建立的过程中,将地震相研究获得的岩性空间趋势与地震数据作为约束,提升反演结果对岩性的刻画能力(图5)。图5为在XQ-XC-HXC-FG构造带的HXC地区中加入地震相确定的须二段第一套砂体边界前后,所得到的HXC地区须二段第一套砂体平面展布特征对比图,由图5可知加入相控后的叠前地质统计学结果对须二段第一套砂体展布特征的刻画更加符合地质规律。

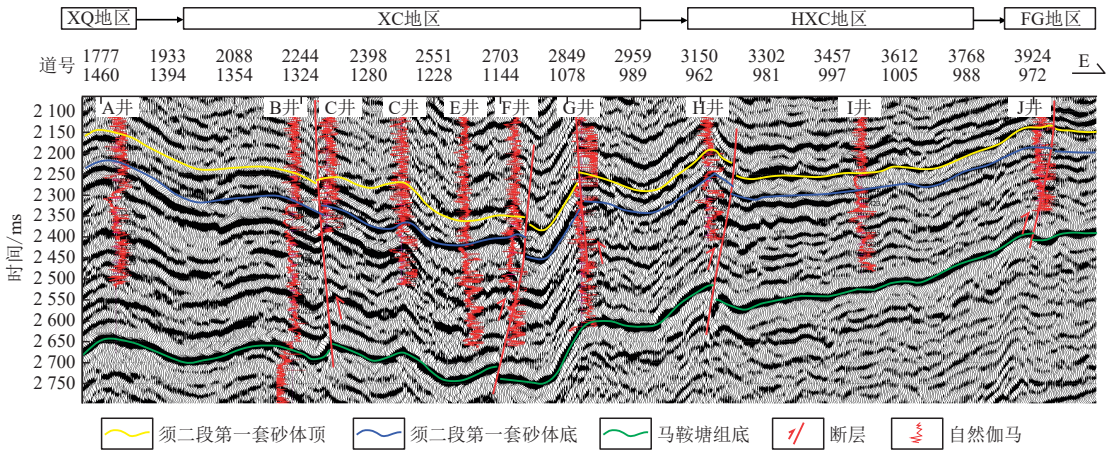


图1 四川盆地川西坳陷XQ-XC-HXC-FG地区须二上亚段连井地震剖面

Fig. 1 Seismic section of the upper part of the second member of Xujiache Formation in XQ-XC-HXC-FG area of western Sichuan Depression, Sichuan Basin

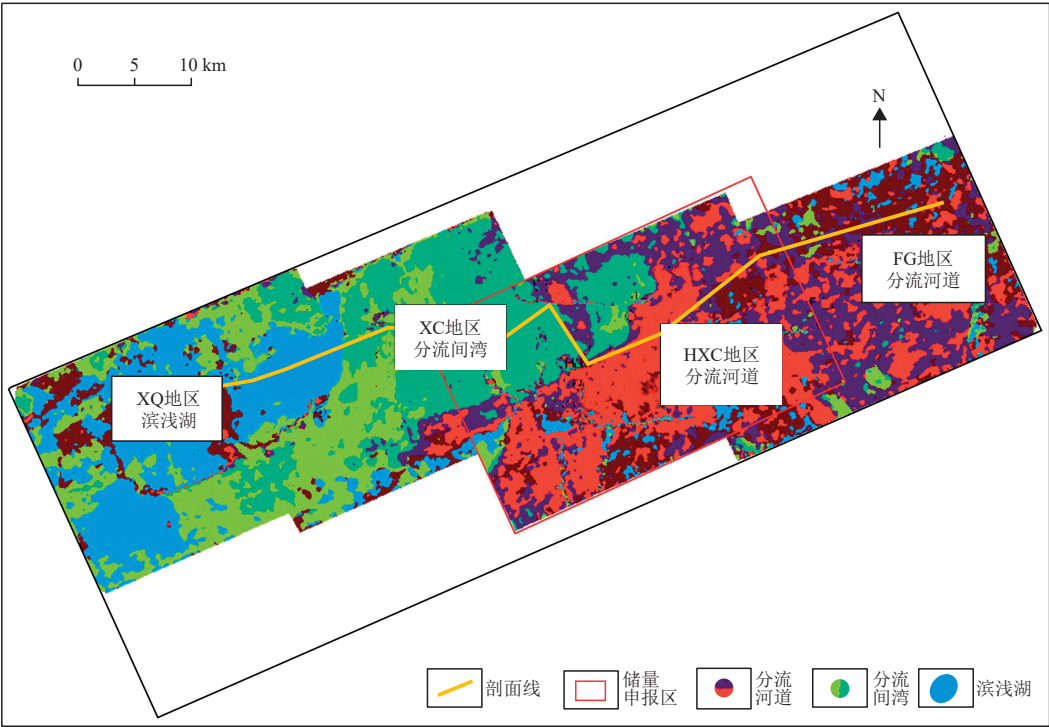
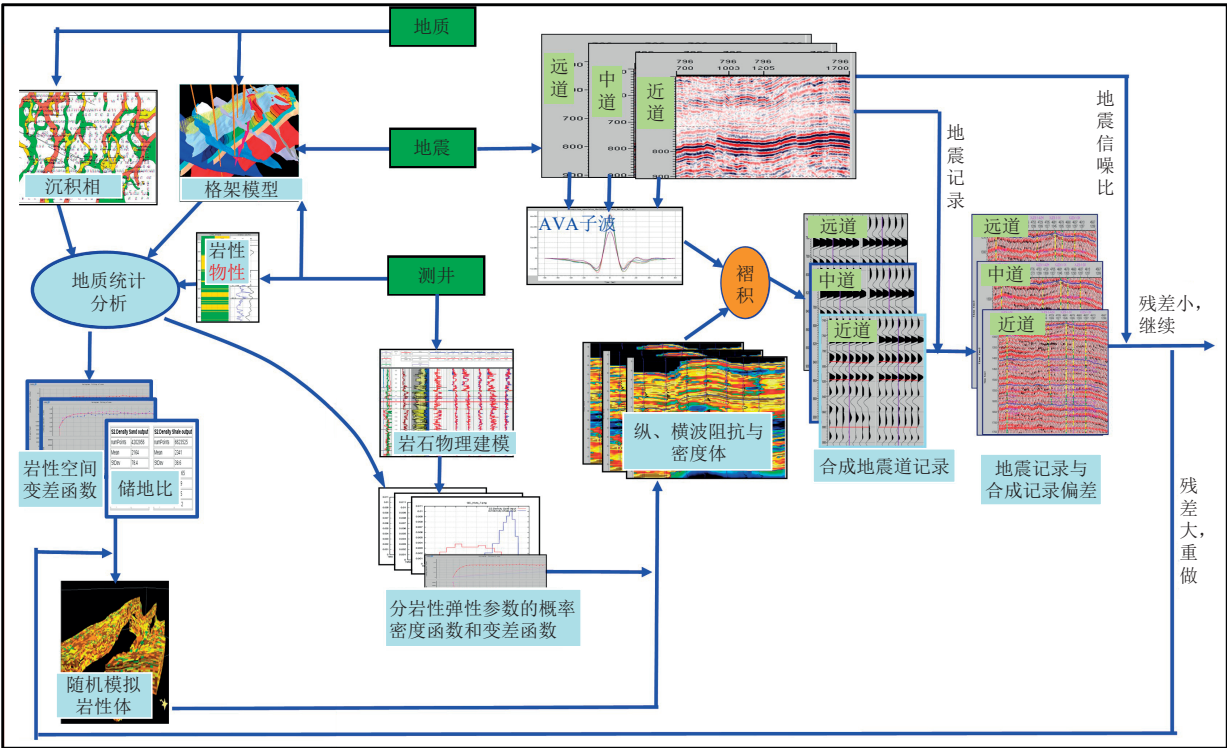


图2 四川盆地川西坳陷XQ-XC-HXC-FG地区须二段第一套砂组地震相平面图

Fig. 2 Seismic facies plan of the first sand formation of the second member of Xujiahe Formation in XQ-XC-HXC-FG area of western Sichuan Depression, Sichuan Basin



注:AVA为振幅随入射角变化的子波。

图3 相控叠前地质统计学反演流程

Fig. 3 Facies-controlled pre-stack geostatistical inversion process

通过叠前地质统计学反演,可以同时得到多个与井吻合,并且符合反演结果的三维岩性实现,最终得到极大似然岩性体。在岩性预测的基础上,采取分岩性统计测

井阻抗与孔隙度关系,建立分岩性下的阻抗-孔隙度统计关系,进行地质统计学协模拟,获取三维孔隙度数据体。根据地质研究和已钻井测井精细解释结果,在HXC

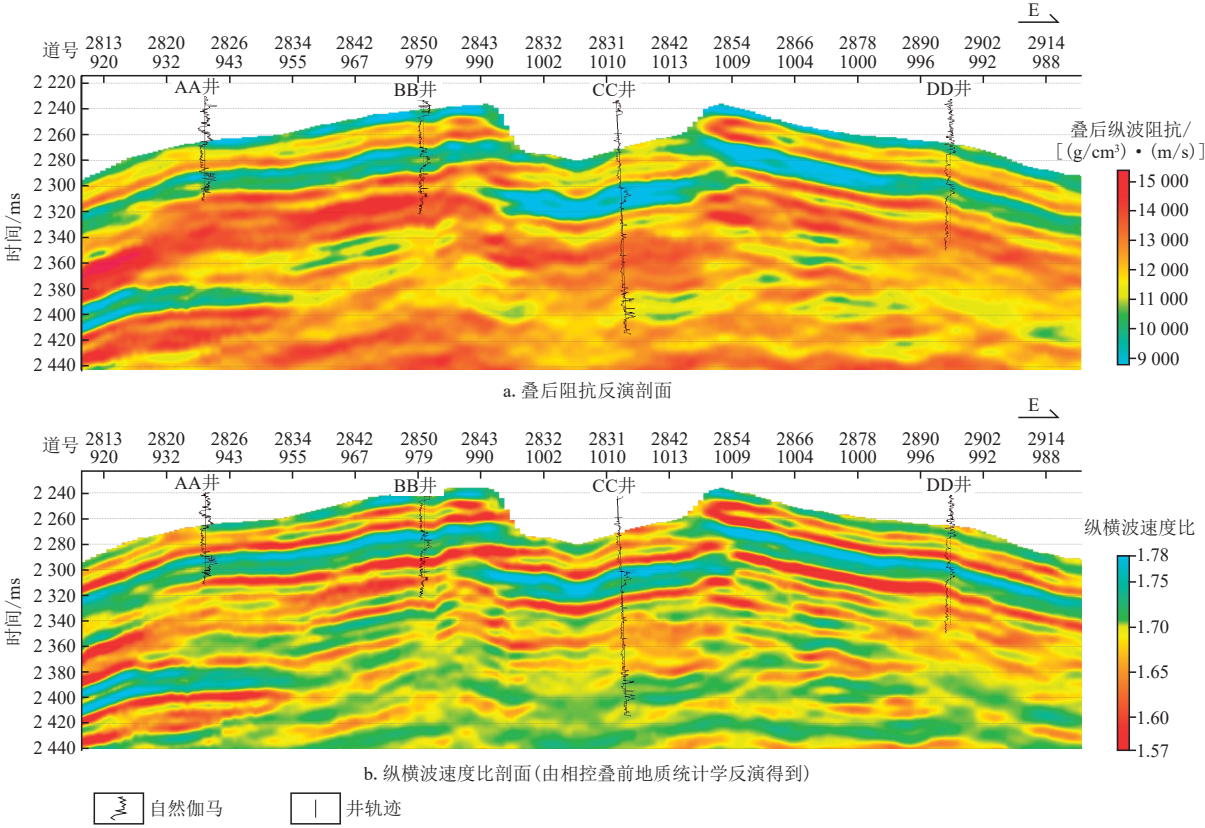


图4 四川盆地川西坳陷HXC地区叠后阻抗反演剖面与纵横波速度比剖面
Fig. 4 Profiles of post-stack impedance inversion profiles and P/S wave velocity ratio of HXC area in western Sichuan Depression, Sichuan Basin

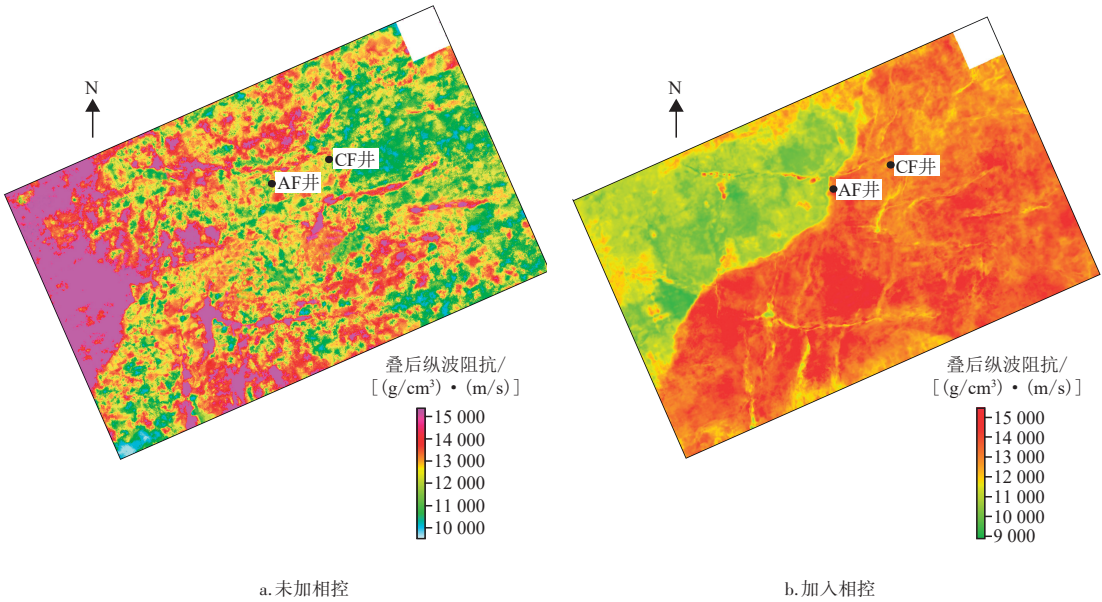


图5 四川盆地川西坳陷HXC地区加入相控前后所提取的须二段第一套砂组平面展布对比
Fig. 5 Comparison of planar distribution of the first sand formation of the second member of Xujiache Formation before and after facies-controlled of HXC area in western Sichuan Depression, Sichuan Basin

地区选取孔隙度大于3%的砂岩为HXC地区须二上亚段的有效储层,并可以在孔隙度反演数据体上开展孔隙度大于3%的有效储层定量平面预测(图6),由图6可知,HXC地区须二上亚段第一套砂组有效储层累计厚度主要集中在15~35 m,向西北方向有效储层的厚度逐渐减薄。通过对比,须二段第一套砂组优质储层厚度预测结果与井实钻平均相对误差仅为3.1%。

3 结论

- 1) 新场构造带须二段上亚段具有多套砂体叠置,砂体横向相变明显的特征,采用常规叠后阻抗反演无法实现有效储层的精准识别和定量预测。
- 2) 结合已钻井测井相分析,基于地震波形特征的地震相分析能有效识别砂体边界,而基于边界约束下建立的低频模型更符合砂体地质展布规律。
- 3) 相控叠前地质统计学反演结合了确定性反演,反映大尺度地质体展布和随机反演刻画薄层的优点,提高了有效储层预测分辨率与吻合率。目前反演结果已应用到该区井位部署和储量提交中,并已产生了一定的油气效益。

参考文献

[1] 阎丽妮,朱宏权,叶素娟,等.新场构造带须家河组二段“饼状”缝的成因及油气地质意义[J]. 油气藏评价与开发, 2023, 13(5): 559-568.
YAN Lini, ZHU Hongquan, YE Sujuan, et al. Origin of “cake-like” fractures and its significance for gas exploration in the second member of Xujiahe Formation of Xinchang structural belt[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13 (5): 559-568.

[2] 杨克明.川西坳陷须家河组天然气成藏模式探讨[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(6): 786-793.
YANG Keming. Gas reservoiring mode in Xujiahe Formation of western Sichuan depression[J]. Oil & Gas Geology, 2006, 27 (6): 786-793.

[3] 吴小平,汪彤彤.电阻率三维反演方法研究进展[J]. 地球物理学进展, 2002, 17(1): 156-162.
WU Xiaoping, WANG Tongtong. Progress of study on 3D resistivity inversion methods[J]. Progress in Geophysics, 2002, 17(1): 156-162.

[4] 杨宇,李瑞,杨滔.白马庙须家河薄互层储层预测方法与应用[J]. 物探化探计算技术, 2012, 34(6): 685-690.
YANG Bo, LI Rui, YANG Tao. Xujiahe thin interbedded reservoir

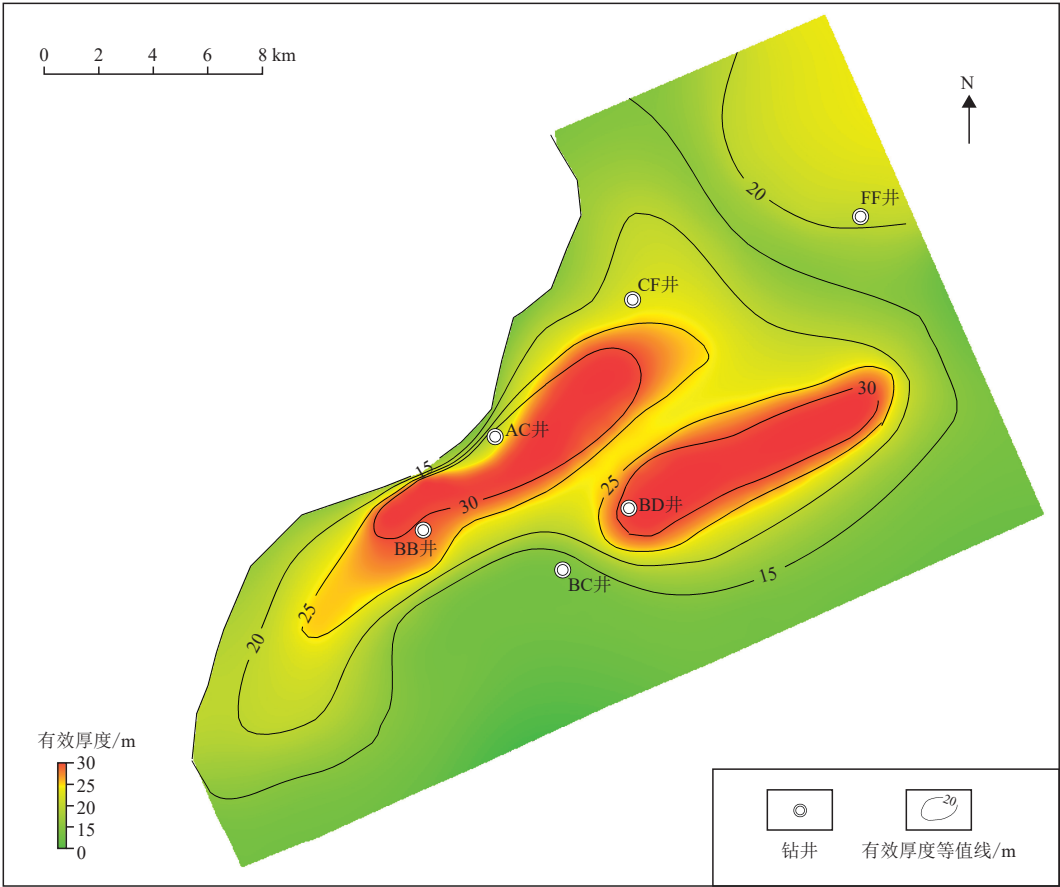


图6 四川盆地川西坳陷HXC地区须二段第一套砂组有效储层厚度平面预测

Fig. 6 Planar prediction of effective reservoir thickness of the first sand formation of the second member of Xujiahe Formation of HXC area in western Sichuan Depression, Sichuan Basin

- prediction methods and applications in Baimamiao[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2012, 34(6): 685–690.
- [5] GONZÁLEZ E F, MUKERJI T, MAVKO G. Seismic inversion combining rock physics and multiple-point geostatistics[J]. Geophysics, 2008, 73(1): R11–R21.
- [6] BORDIGNON F L, De FIGUEIREDO L P, AZEVEDO L, et al. Hybrid global stochastic and Bayesian linearized acoustic seismic inversion methodology[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2017, 55(8): 4457–4464.
- [7] YANG X W, MAO N B, ZHU P M. Hybrid inversion of reservoir parameters based on cosimulation and the gradual deformation method[J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2022, 60: 5913211.
- [8] 钱玉贵, 叶泰然, 张世华, 等. 叠前地质统计学反演技术在复杂储层量化预测中的应用[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 834–840. QIAN Yugui, YE Tairan, ZHANG Shihua, et al. Application of pre-stack geo-statistics inversion technology in quantitative prediction of complex reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(6): 834–840.
- [9] 叶艳, 王元君, 周怀来, 等. 地质统计学反演在什邡气田A区块储层预测中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2015, 37(2): 236–241. YE Yan, WANG Yuanjun, ZHOU Huailai, et al. Application of geostatistical inversion to reservoir prediction in Shifang gas field[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 37(2): 236–241.
- [10] 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 geostatistic inversion method to predicting the thin sandstone reservoir[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2011, 35(6): 804–808.
- [11] 伍新和, 林良彪, 张玺华. 地震波形分析技术在川西新场地区沉积微相研究中的应用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2013, 40(4): 409–416. WU Xinhe, LIN Liangbiao, ZHANG Xihua. Application of seismic waveform analysis technology in studying sedimentary microfacies of Xinchang region in West Sichuan, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2013, 40(4): 409–416.
- [12] 张国华, 张会星. 地质统计学反演与常规反演在储层预测中的应用效果对比分析[J]. 中国煤炭地质, 2015, 27(4): 57–62. ZHANG Guohua, ZHANG Huixing. Geostatistical inversion and conventional inversion application effect contrastive analysis in reservoir prediction[J]. Coal Geology of China, 2015, 27(4): 57–62.
- [13] 闵小刚, 康安, 周守信. 基于相控地质统计学反演的薄储层岩性、物性预测[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(3): 27–32. MIN Xiaogang, KANG An, ZHOU Shouxin. Lithological and physical properties prediction of thin reservoirs based on facies-controlled geo-statistical inversion[J]. Marine Geology Frontiers, 2015, 31(3): 27–32.
- [14] 杨丽兵, 张虹, 谯述蓉, 等. 随机地震反演在川西坳陷DY构造储层预测中的应用[J]. 石油物探, 2010, 49(4): 373–379. YANG Libing, ZHANG Hong, QIAO Shurong, et al. Application of stochastic seismic inversion on reservoir prediction of DY structure in Western Sichuan Depression[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2010, 49(4): 373–379.
- [15] 张义, 尹艳树, 秦志勇, 等. 地质统计学反演在薄砂体储层预测中的应用[J]. 断块油气田, 2015, 22(5): 565–569. ZHANG Yi, YIN Yanshu, QIN Zhiyong, et al. Application of geostatistical inversion in thin sand reservoir prediction[J]. Fault Block Oil & Gas Field, 2015, 22(5): 565–569.
- [16] 白桦, 杨晓, 熊艳, 等. 川中地区凉高山组湖岸线识别及致密油气有利区[J]. 天然气工业, 2022, 42(2): 40–49. BAI Hua, YANG Xiao, XIONG Yan, et al. Determination of Lianggaoshan Formation lake strandline and favorable tight oil and gas areas in the central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(2): 40–49.
- [17] 范洪军, 范廷恩, 王晖, 等. 地震波形分类技术在河流相储层研究中的应用[J]. CT理论与应用研究, 2014, 23(1): 71–80. FAN Hongjun, FAN Ting'en, WANG Hui, et al. Application of seismic waveform classification technology in the study of fluvial reservoir[J]. CT Theory and Applications, 2014, 23(1): 71–80.
- [18] 贾秀容, 谢春安, 李恒权, 等. 地震波形分类在春光探区沉积微相研究中的应用[J]. 石油地质与工程, 2019, 33(2): 36–40. JIA Xiurong, XIE Chun'an, LI Hengquan, et al. Application of waveform classification in sedimentary microfacies of Chunguang exploratory area[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2019, 33(2): 36–40.
- [19] 董洪超, 范洪军, 王宗俊, 等. 基于精细地层格架的古近系储层相控反演技术研究[J]. 物探化探计算技术, 2021, 43(2): 154–160. DONG Hongchao, FAN Hongjun, WANG Zongjun, et al. Facies-constrained inversion technology of paleogene reservoir based on fine stratigraphic framework[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 43(2): 154–160.
- [20] 陈美伊, 秦月霜, 王建民, 等. 基于等时相控反演的致密砂岩储层地震识别方法[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(4): 782–791. CHEN Meiyi, QIN Yueshuang, WANG Jianmin, et al. Tight sandstone reservoir identification based on isochronal phase-controlled inversion[J]. Geophysical Petroleum Exploration, 2016, 51(4): 782–791.
- [21] 张生, 黄捍东, 王星星, 等. 车西洼陷西北陡坡沙三下亚段地震相控反演砂砾岩储层预测[J]. 地学前缘, 2018, 25(2): 210–220. ZHANG Sheng, HUANG Handong, WANG Xingxing, et al. Prediction of sand-conglomerate reservoirs via seismic facies controlled inversion in the Lower Es-3 of the northern steep slope of the Chexi Sag[J]. Earth Science Frontiers, 2018, 25(2): 210–220.
- [22] 赵宝银, 张明. 相控叠前地质统计学反演方法在低渗油藏优质储层预测中的应用——以A区沙三段3亚段V油组为例[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(4): 666–676. ZHAO Baoyin, ZHANG Ming. Application of facies-controlled prestack geostatistical inversion method in high quality reservoir prediction of low permeability reservoir: A case study of V Oil Formation of Es₃ in Block A[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(4): 666–676.
- [23] 韩磊, 刘俊州, 杨睿, 等. 基于VTI介质的叠前弹性阻抗反演方法应用——以川西坳陷须家河组致密砂岩裂缝性储层为例[J]. 油气藏评价与开发, 2022, 12(2): 313–319. HAN Lei, LIU Junzhou, YANG Rui, et al. Application of pre-stack elastic impedance inversion method based on VTI medium: A case of tight sandstone fractured reservoir in Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2022, 12(2): 313–319.