

致密砂岩“甜点”预测及在井位部署中的应用

张 昊, 张军林, 胡云亭, 万 欢, 逢建东, 石雪峰, 周龙刚

(中海油能源发展股份有限公司 工程技术分公司, 天津 300452)

摘要:致密砂岩油气藏是目前非常规油气勘探开发研究的重点和难点,对其“甜点”的有效识别影响了勘探开发策略和井位的部署。致密砂岩储层岩性致密、横向变化快且厚度较薄,只用纵波阻抗对致密砂岩储层和含气砂岩难以识别。针对以上特点,以岩石物理分析为基础,综合约束稀疏脉冲反演和地质统计学反演进行储层预测,利用 AVO 流体检测技术和纵横波速度比(V_p/V_s)刻画含气砂岩的分布范围,开展致密砂岩储层识别及储层含气性预测,提高优质砂岩的识别及预测精度,并在鄂尔多斯盆地 F 区块太原组井位部署中进行应用,取得了良好的实际效果,具有推广价值和可操作性。

关键词:致密砂岩;“甜点”预测;地震反演;AVO 流体预测;井位部署

中图分类号:P631.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)01-0262-07

目前,中国油气勘探已开始由常规油气藏向非常规油气藏过渡,其中致密砂岩油气藏在非常规储层中占据重要地位,也是今后科研人员研究的难点和重点^[1-2]。中国致密砂岩油气藏勘探开发过程与美国相比较晚,但勘探潜力巨大,鄂尔多斯、四川、准噶尔、松辽、塔里木等多个盆地均有发育,其勘探开发研究发展迅速^[3]。

致密砂岩油气藏一般是指经过改造措施(以压裂为主)或者采用水平井、多分支井,才能产出工业性油气流的砂岩油气藏。与常规储层相比,致密储层具有岩性致密、纵向岩性组合多样且储层较薄等特点^[4-6],这些特点给致密砂岩“甜点”的精确识别带来了巨大挑战。地球物理技术作为全面、有效地勘探开发致密油气的重要手段,在致密砂岩“甜点”预测过程中显得尤为重要^[7-8]。前人研究表明,致密油气藏的地质“甜点”主要包括储层展布和烃类分布两方面。笔者从岩石物理分析、储层预测方法分析、烃类检测方法分析等方面对致密储层“甜点”预测方法进行阐述,开展致密砂岩气藏储层识别及含气性预测方法研究,提高优质储层的识别及预测精度,并在鄂尔多斯盆地 F 区块太原组井位部署中进行了应用。

F 区块位于鄂尔多斯盆地的东北部,处于伊陕斜坡和晋西挠褶之间^[9],面积约 50 km²,地层沉积

连续且平整(倾角小于 3°),以海陆过渡相-陆相碎屑岩沉积为主,太原组主要为浅水三角洲环境水下分流河道砂体发育,整体上砂体呈南北向展布^[5]。太原组粗碎屑岩孔渗条件相对较好,容易充注成藏,粗粒砂岩物性好,气层相对发育,是 F 区块的重点研究对象和主力层系。

1 致密砂岩储层“甜点”预测

致密储层“甜点”主要包括储层展布特征和储层含气性特征两方面。针对鄂尔多斯盆地 F 区块,以岩石物理分析为基础,开展储层预测、储层含气性预测等研究工作。

1.1 岩石物理分析

岩石物理分析是通过建立地震弹性参数与地质参数之间的关系,开展地震储层预测的必要基础^[10-12]。岩石各类弹性参数(纵横波速度、密度)受岩性、物性、流体等多种因素的影响^[10],在致密砂岩油气藏中,单凭纵波阻抗很难有效区分干砂岩、含气砂岩和泥岩等基本岩性。通过建立 F 区块的岩石物理量版,分析砂岩、含气砂岩的敏感岩石物理参数,为致密砂岩“甜点”的地球物理预测打下良好基础。

针对 F 区块太原组地层,建立不同含气饱和度与不同孔隙度条件下的主要岩性纵波阻抗- V_p/V_s 岩石物理定量解释模板(图 1)。通过岩石物理量版

收稿日期:2021-09-12

基金项目:中国海洋石油总公司重大科技专项(CNOOC-KJ 135KJXM NFGJ2016-05)。

作者简介:张昊(1988—),男,山东诸城人,中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司,中级工程师,硕士,研究方向为油气勘探、地质工程。

分析认为,F 区块纵波阻抗砂泥岩叠置、重合率高,不能有效区分砂泥岩,更难以区分含气砂岩与泥岩、干砂岩与含水砂岩。但通过量版分析可知,综合利用 V_p/V_s 、纵波阻抗等岩石物理参数,对砂岩和泥岩有一定的区分度,煤岩、泥岩、干砂、气砂等工

区内主要的几类岩石在岩石物理量版上均有一定的弹性参数识别窗口。同时分析可得, V_p/V_s 对含气砂岩与干砂岩有一定区分度,可以利用叠前地震反演方法,通过 V_p/V_s 在空间的展布特征,对研究区目的层含气储层进行有效描述。

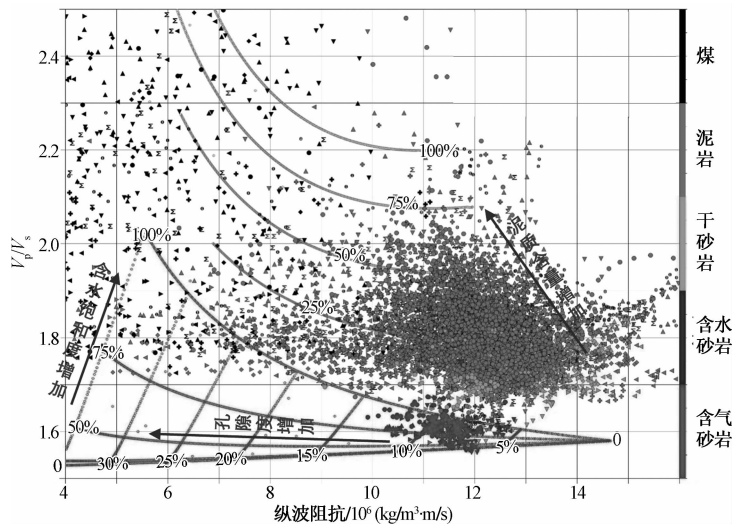


图 1 岩石物理解释量版

1.2 致密砂岩储层预测

约束稀疏脉冲反演的垂向分辨率理论上能分辨 $1/4 \sim 1/8$ 波长厚度的地层^[13]。F 区块太原组地震资料主频大约为 30 Hz,主要目的层段地层平均速度为 4 000~5 500 m/s,地层垂向分辨率($1/4$ 波长)为 33~41.7 m,极限分辨率($1/8$ 波长)为 16.6~20.8 m,而根据测井解释结果 F 区块太原组砂体厚度偏薄,砂体厚度大部分都小于 7 m。在地震最大调谐厚度和确定性反演极限分辨厚度之下,约束稀疏脉冲反演只能分辨大套的砂层组,精细刻画致密薄砂体层要在约束稀疏脉冲反演基础上进行地质统计学反演。特别值得注意的是,约束稀疏脉冲反演是取得良好地质统计学反演的基础^[14-16],通过约束稀疏脉冲反演结果与靶区沉积储层基本特征对比分析,对研究区储层的空间展布进行初步预测。在此基础上,进行重点区块的地质统计学反演。

地质统计学反演是一种综合利用地震、测井、地质资料,利用马尔科夫链-蒙特卡罗算法(Markov Chain Monte Carlo, MCMC)的随机反演方法^[17-20]。较约束稀疏脉冲反演而言,它充分利用了地震资料的横向分辨率以及测井数据纵向分辨率高的优势,发挥随机反演过程充分利用随机模拟的特点,适用于各种地质条件复杂的地区,提高纵向分辨率,与

地下真实情况更为接近,更准确地预测高精度储层^[21-23]。

地质统计学反演主要包括变差函数、概率密度函数和岩性比例 3 个关键参数^[21]。变差函数描述的是不同岩相在空间范围内展布特征(图 2)。根据已钻井数据统计的变差函数,调试基台值、块金值、变程(表 1)等相关参数,拟合目的层段变差函数^[24-25]。一般而言,纵向变程越小,模拟出的岩性厚度越小。对于纵向变程,利用测井数据采样间距小(一般为 0.125 m)的特点进行纵向变程的统计分析。对于横向变程,考虑到井点位置等实际情况,以约束稀疏脉冲反演结果结合区域地质认识进行综合设定。岩性比例是为了使反演过程融入更多地质信息,结合区域地质认识,通过对已

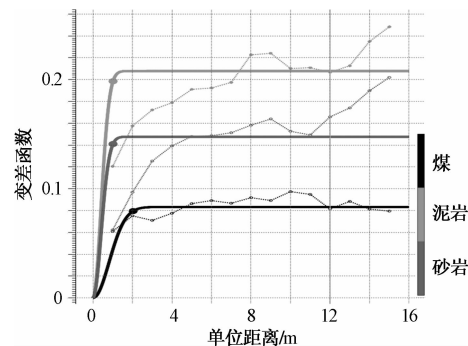


图 2 概率密度函数统计结果

钻井的岩性划分得到的参数,对地质统计学反演起到一定的约束的作用(图 3)。概率分布函数是多个弹性物理参数拟合的高斯概率分布函数(图 4)。针对 F 区块太原组储层特征,致密砂岩分布区间主要位于低纵横波速度比,中低密度、中高阻抗区域。

表 1 不同方向弹性参数变程

岩性	X/m	Y/m	Z/m
砂岩	800	1 600	1
泥岩	1 000	1 600	1
煤	1 600	1 600	2

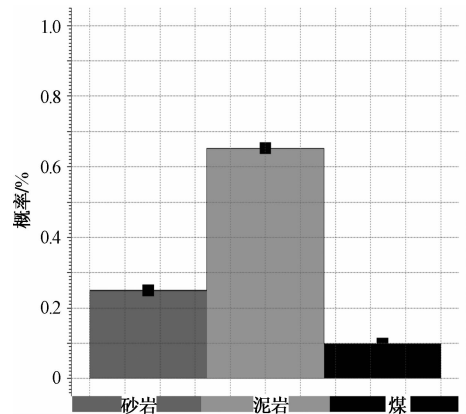


图 3 岩性比例统计结果

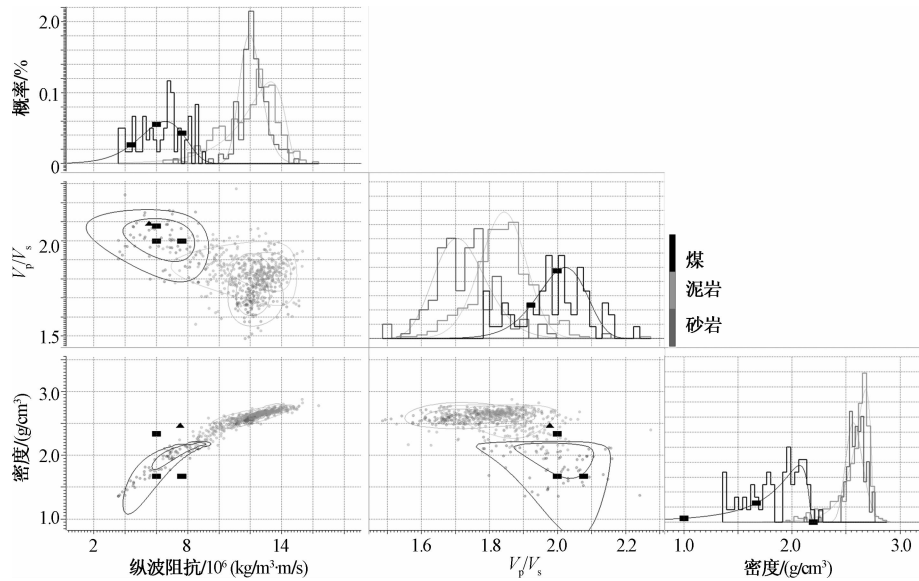


图 4 主要岩性变差函数分析结果

通过对各个参数的设定,利用叠前地震数据进行地质统计学反演计算弹性参数体(纵横波阻抗、 V_p/V_s 等),进而对致密储层的砂体概率进行刻画,结合区域地质认识与钻井情况描述砂体厚度。通过反演结果对比可以看出,约束稀疏脉冲反演与地震波形契合度很高,地质统计学反演与稀疏脉冲反演结果非常吻合,平剖面砂体发育特点相似,反演结果比较可靠。同时可以看出,地质统计学反演细节更丰富、分辨率更高,对于工区的砂体展布认识更清晰,更利于井位部署、井位优化及后续随钻跟踪(图 5)。平面上,F 区块物源来自工区北部,主河道的展布清晰,砂体近南北向发育为主,与河道展布特征一致,厚度整体介于 0~20 m,主体厚度区间介于 6~12 m(图 6)。

1.3 致密砂岩含气性预测

含气砂岩平面展布特征的描述是致密砂岩储层预测的核心工作,其空间展布特质直接影响后续

地质评价工作的成败,为了更为客观合理地对含气砂岩进行刻画,研究从弹性参数反演和 AVO 流体预测两方面入手,对致密砂岩储层含气性进行岩性。

1.3.1 基于 V_p/V_s 的含气砂岩预测方法

基于岩石物理分析和概率密度函数分析可以得出,太原含气砂岩在纵波阻抗中的概率密度函数的峰值为 $1.15 \times 10^7 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$,在 V_p/V_s 中的概率密度函数的峰值为 1.68,在密度中的概率密度函数的峰值为 2.45 g/cm^3 ;非含气砂岩在纵波阻抗中的概率密度函数的峰值为 $1.35 \times 10^7 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{m/s}$,在 V_p/V_s 中的概率密度函数的峰值为 1.85,在密度中的概率密度函数的峰值为 2.65 g/cm^3 (图 7)。由此可见,纵波阻抗和密度对含气砂岩区分度较低,低 V_p/V_s 对于其的区分度较高。在叠前道集的预处理和测井曲线的标准化基础上,利用叠前约束稀疏脉冲反演,通过描述 V_p/V_s 在空间的展布特征,有效表征目的层的含气性。

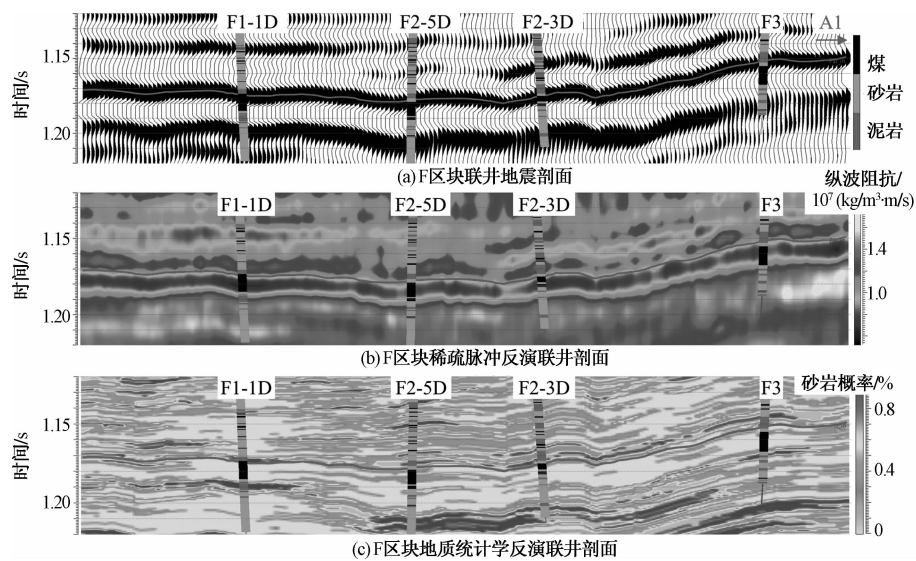


图 5 约束稀疏脉冲反演与地质统计学反演剖面对比

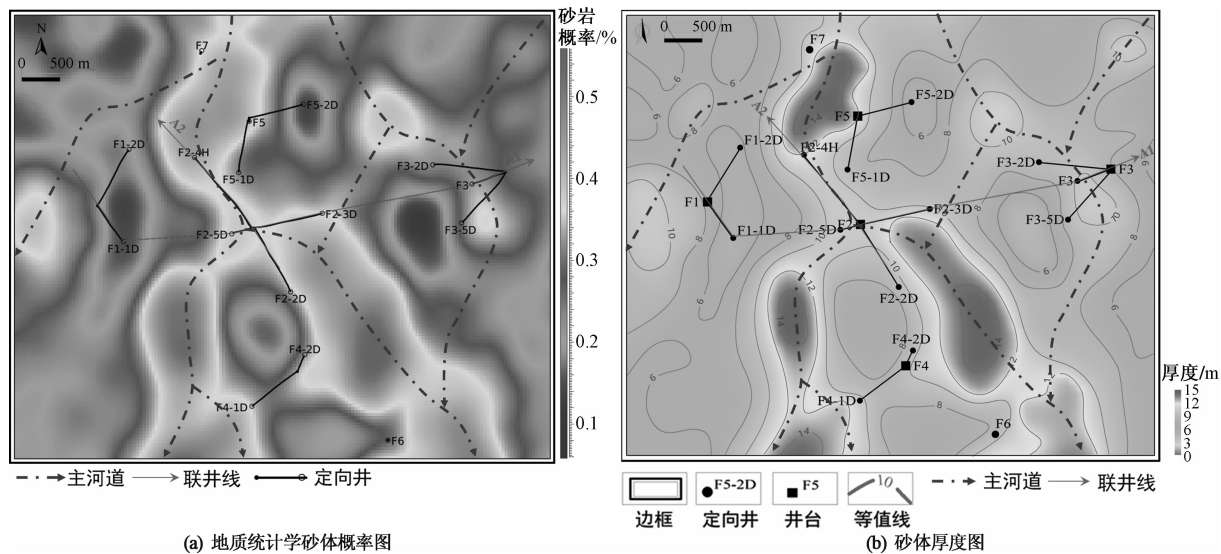
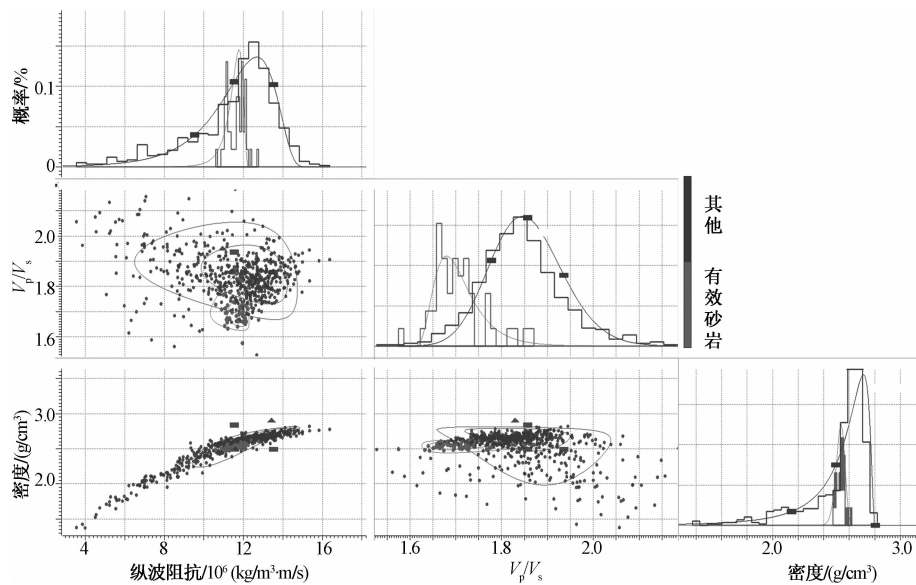


图 6 地质统计学砂体概率图和砂体厚度图



1.3.2 基于叠前 AVO 流体因子的储层含气性预测

AVO 技术作为目前应用最广泛的研究储层识别、流体检测的勘探技术,使地球物理理论能够有效指导储层烃类的识别工作,因此,AVO 流体检测迅速发展成为储层流体检测的重要手段^[26]。在含有烃类流体的储层介质中,会有明显的 AVO 现象,而不含流体的围岩储层,AVO 现象不明显,不同偏移距道集会对储层流体产生不同的响应特征,既利用储层介质的 AVO 现象进行流体检测成为可能,也成为现有技术条件下的较为成熟的流体检测工具^[26]。研究表明,鄂尔多斯盆地 F 区块储层含气 AVO 响应明显,可以利用 AVO 反演进行储层含气性预测。

AVO 反演过程中的道集预处理和叠前 AVO 反演流体因子构建是应用叠前地震资料成功进行流体预测的关键因素。流体因子是采用 AVO 反演

所得到的纵波阻抗反射率($\Delta V_p/V_p$)与横波阻抗反射率($\Delta V_s/V_s$)交汇分析方法进行流体因子属性的构建。具体方法是:计算平面上每一个纵波阻抗反射率与横波阻抗反射交汇点到泥岩基线的距离,该距离的大小可度量储层含烃类大小的可能性,该距离越大,流体因子值越高,储层含油气的可能性越大。通过这种方法,对 F 区块太原组流体进行平面预测。

从太原组 V_p/V_s 平面图与 AVO 流体预测精度分析图可以看出(图 8),两种方法预测的储层有效厚度优势区平面分布特征基本一致,但在细节上含气砂体平面展布特征存在一定的差异性。原因是太二段致密砂岩属于煤系储层,由于煤系储层强干涉的影响,各类流体检测方法受一定程度的影响。对于 F 区块储层综合评价还需在储层展布特征的基础上进行含气砂岩发育特征评定。

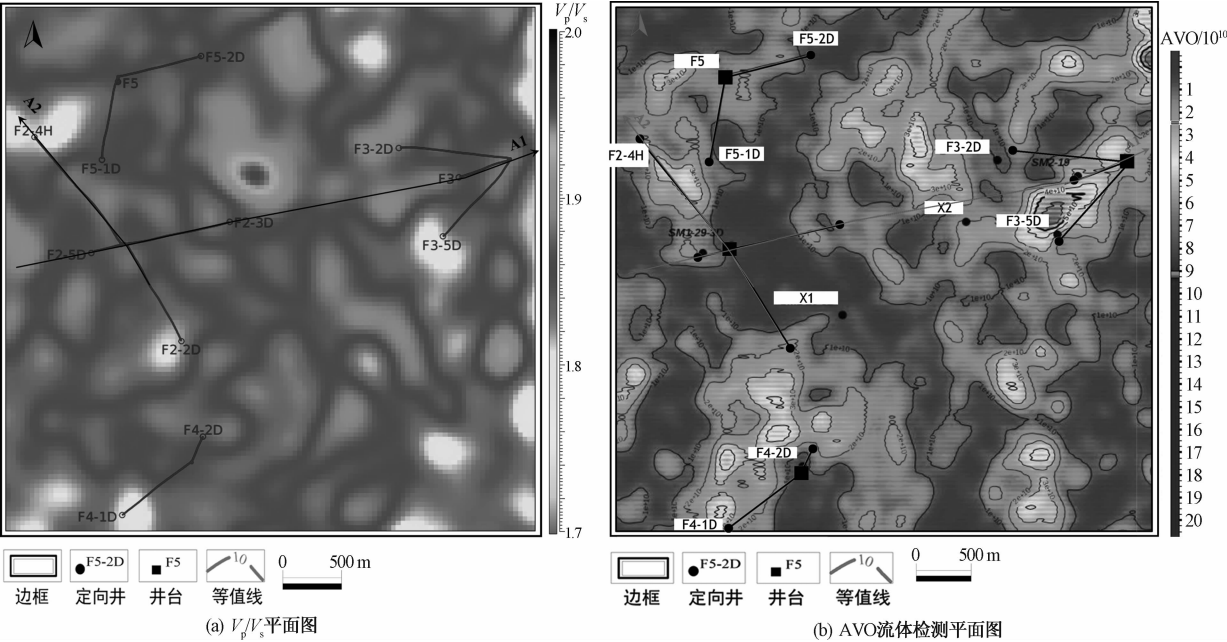


图 8 V_p/V_s 平面图与 AVO 流体检测对比图

2 应用实例

通过以上研究分析可以看出,F 区块主要发育分流河道、水下分流河道砂体,以太原组浅水三角洲平原-前缘沉积环境为基础,结合叠前地震反演、AVO 流体检测等手段,确定太原组主河道流向以近南北向为主,预测太原组砂体主体厚度区间介于 6~12 m,其中有效砂体主体厚度区间介于 2~6 m,气层分布与砂体分布具有一致性。

基于对 F 区块储层和含气砂岩的认识,指导了

F 区块井位部署和井位优化等工作。其中,F2 井区 F2-H 水平井目的层为太 2 段,设计阶段利用砂体反演结果,并在此基础上结合 V_p/V_s 反演结果和 AVO 流体检测等手段,进行井位部署和随钻调整(图 9)。钻井结果显示,F2-H 水平井水平段长度 637 m,方位 $316^{\circ}\sim 320^{\circ}$,测井解释累计含气砂岩 400 m 以上(气层 316.5 m,差气层 86.1 m),砂体钻遇率 100%,有效砂体钻遇率 63.2%,取得了非常好的钻井成绩。

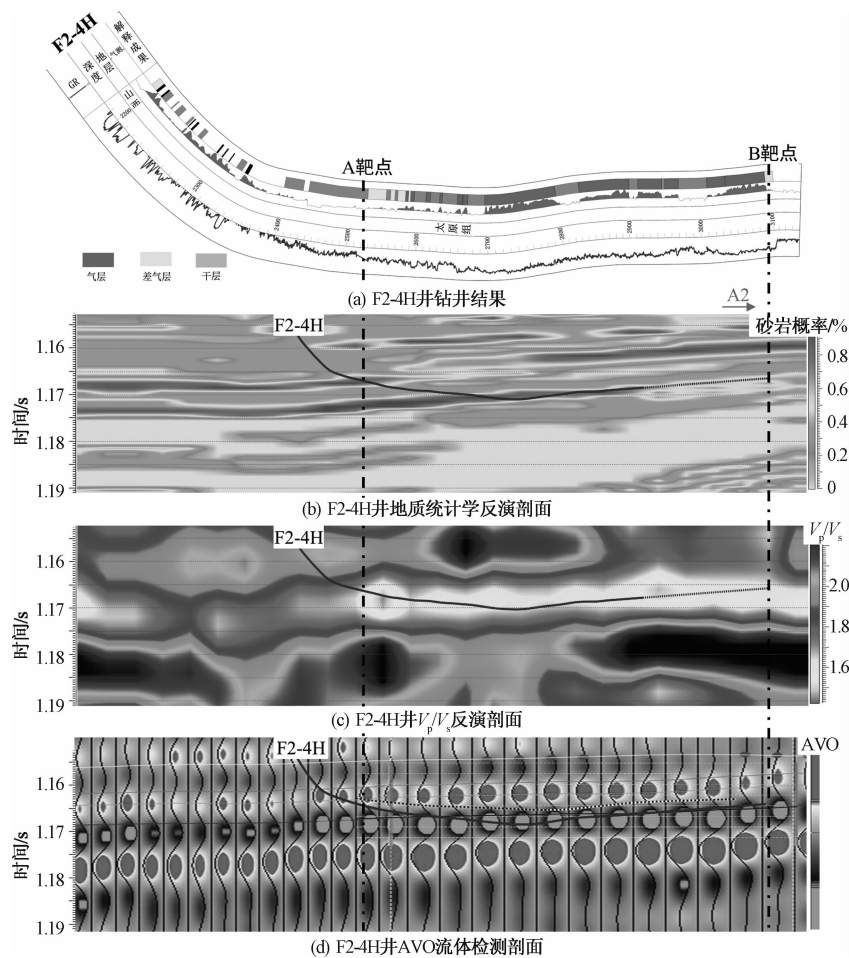


图 9 F2 井区砂体反演和有效砂体检测与钻井结果对比图

3 结论

1)致密储层具有岩性致密且储层较薄等特点,但在岩石物理量版上均有一定的识别窗口,综合利用 V_p/V_s 、纵波阻抗等岩石物理参数可以有效识别致密储层。在约束稀疏脉冲反演的基础上,进行地质统计学反演可以有效识别致密薄储层和含气砂岩。

2)在含有烃类流体的致密储层介质中有明显的 AVO 现象,可以利用这种 AVO 现象进行流体检测;同时,也可以利用约束稀疏脉冲反演得到 V_p/V_s 表征储层含气性。

3)以岩石物理量版为基础,综合利用各类储层预测方法和含气性检测方法,对致密薄储层“甜点”进行地球物理预测,并在 F 区块进行成功应用,在该区勘探开发一体化过程中的井位部署和优化起到了重要作用。

参考文献

[1] 马新华,贾爱林,谭健,等. 中国致密砂岩气开发工程技术与实践[J]. 石油勘探与开发 2012,39(5):572-579.

[2] 戴金星,倪云燕,吴小奇. 中国致密砂岩气及在勘探开发

上的重要意义[J]. 石油勘探与开发,2012,39(3):257-264.

[3] 刘吉余,马志欣,孙淑艳. 致密含气砂岩研究现状及发展展望[J]. 天然气地球科学,2008(3):316-319,366.

[4] 姚海鹏,朱炎铭,刘宇,等. 鄂尔多斯盆地伊陕斜坡北部煤系非常规天然气成藏特征[J]. 科学技术与工程,2018,18(3):160-167.

[5] 田兵,段志强,赵俊梅,等. 鄂尔多斯盆地神府地区含煤层气系统特征[J]. 科学技术与工程,2021,21(22):9298-9305.

[6] 黄正良,武春英,马占荣,等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系马家沟组沉积层序及其对储层发育的控制作用[J]. 中国石油勘探,2015,20(5):20-29.

[7] 汪关妹,张万福,张宏伟,等. 致密砂岩气地震预测关键技术及效果[J]. 石油地球物理勘探,2020,55(S1):72-79,7.

[8] 韩刚,高红艳,龙凡,等. 叠前反演在西湖凹陷致密砂岩储层“甜点”预测中的应用[J]. 石油物探,2021,60(3):471-478.

[9] 刘硕. 鄂尔多斯地区致密碎屑岩油气储层地震预测研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2020.

[10] 李国斌,张亚军,谢天峰,等. 煤系地层致密砂岩气甜点区地震逐级预测:以鄂尔多斯盆地东南缘下二叠统山西组 2³亚段为例[J]. 天然气工业,2020,40(5):34-42.

[11] 赵海波,唐晓花,李奎周,等. 基于地震岩石物理分析与叠前地质统计学反演技术的齐家地区致密薄储层预测[J]. 石油物探,2017,56(6):853-862.

[12] 刘玲,沃玉进,孙炜,等. 龙门山前侏罗系沙溪庙组致密砂岩储层叠前地震预测[J]. 天然气地球科学,2019,30(7):1072-1082.

[13] 陈伟,李霞,李红敬,等. 油气地球物理技术进展[J]. 科学技术与工程,2020,20(4):1289-1301.

[14] 王东坤,路媛媛,李林涓,等. 基于地震相控反演的海相煤系致密砂岩储层预测[J]. 科学技术与工程,2020,20(30):12349-12354.

[15] 马玉亮,郑欢,谢锐杰,等. 井震资料在储层预测中存在的几个主要问题及处理方法[J]. 科学技术与工程,2019,19(33):132-138.

[16] 马良涛,范廷恩,王宗俊,等. 不同地质条件下反演低频模型构建方法分析[J]. 地球物理学进展,2021,36(2):625-635.

[17] 王泽明. 致密砂岩气藏储层特征及有效储层识别研究:以苏里格气田为例[D]. 武汉:中国地质大学,2010.

[18] 罗钊江,罗耀华,鲁建隆,等. 基于地质统计学反演方法的洛带气田储层预测[J]. 物探化探计算技术,2019,41(2):200-206.

[19] 周爽爽,印兴耀,裴松,等. 地震波形约束的蒙特卡洛-马尔科夫链随机反演方法[J]. 石油地球物理勘探,2021,56(3):543-554,592,413.

[20] HAAS A,DUBRULE O. Geostatistical inversion: A sequential method of stochastic reservoir modeling constrained by seismic data[J]. First break,1994,12(11):561-569.

[21] DUBRULE O,THIBAUT M,Lamy P,et al. Geostatistical reservoir characterization constrained by 3D seismic data[J]. Petroleum geoscience,1998,4(2):121-128.

[22] CLAYTON R W,STOLT R H. A Born-WKB inversion method for acoustic reflection data[J]. Geophysics,1981,46(11):1559.

[23] HUANG Z Y,GAN L D,DAI X F,et al. Key parameter optimization and analysis of stochastic seismic inversion[J]. Applied geophysics,2012,9(1):49-56.

[24] 李炳颖,黄鑫,王伟,等. 基于叠前地质统计学反演的高分辨率河道识别及薄层预测:以东海 B 气田为例[J]. 工程地球物理学报,2020,17(2):236-241.

[25] 程志国,胡婷婷,瞿建华,等. 准噶尔盆地玛西地区致密砂砾岩优质薄储层预测[J]. 物探与化探,2015(5):891-896.

[26] 周伟,郭海敏. 基于叠前反演的流体识别与频散 AVO 反演研究[J]. 科学技术与工程,2017,17(33):26-35.

Tight Sandstone “Sweet Spot” Prediction and Its Application in Well Deployment

ZHANG Hao, ZHANG Junlin, HU Yunting, WAN Huan, PANG Jiandong,
SHI Xuefeng, ZHOU Longgang

(Engineering Technology Branch,CNOOC Energy Tech-Drilling & Production Co. ,Ltd. ,Tianjin 300452,China)

Abstract: Tight sandstone reservoirs are currently the focus and difficulty of unconventional oil and gas exploration and development. The effective description of the “sweet spot” of tight sandstone affects exploration and development strategies and well placement deployment. Tight sandstone reservoirs have tight lithology, rapid lateral changes and thin thickness. It is difficult to identify tight sandstone reservoirs and effective reservoirs only by P-wave impedance. In view of the above characteristics, based on petrophysical analysis, comprehensively restrict sparse pulse inversion and geostatistical inversion for reservoir prediction, AVO fluid detection technology and P/S wave velocity ratio (V_p/V_s) was used to describe effective reservoirs Distribution range. Research on tight sandstone reservoir identification and gas-bearing prediction methods was carried out, which improved effective reservoir identification and prediction accuracy, and applied it in the well location deployment of Taiyuan Formation in Block F of the Ordos Basin, achieving good practical results and having promotion value and operability.

Keywords: tight sandstone; “sweet spot” prediction; seismic inversion; AVO fluid prediction; well deployment