

doi: 10.11720/wtyht.2014.6.12

蔡克汉, 张盟勃, 高改, 等. 基于叠前反演的储层预测技术在陕北黄土塬白云岩气藏的应用[J]. 物探与化探, 2014, 38(6): 1164-1171. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2014.6.12>

Cai K H, Zhang M B, Gao G, et al. The application of the technology based on pre-stack inversion to reservoir prediction in the dolomite gas reservoir of the Northern Shaanxi loess tableland[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(6): 1164-1171. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2014.6.12>

基于叠前反演的储层预测技术 在陕北黄土塬白云岩气藏的应用

蔡克汉, 张盟勃, 高改, 刘峰, 杜广宏, 许磊明

(中国石油长庆油田公司 勘探开发研究院, 陕西 西安 710021)

摘 要: 近年来, 陕北黄土塬地区下古生界奥陶系中组合马五₅ 地层发现了一大批白云岩岩性气藏。但是由于黄土塬地表条件复杂, 地震资料成像精度差, 马五₅ 储层分布面积广、厚度薄、非均质性强、横向变化快, 地震预测难度非常大。文中针对近年在陕北苏 203 井区实施的 600 km² 三维高保真地震资料, 在强化岩石物理分析和叠前反演的基础上, 创新应用 FFP(岩相流体概率)分析技术, 结合完钻井拟合弹性参数函数关系式, 计算得到工区马五₅ 地层的白云岩概率体、含气概率体、孔隙度及含气饱和度, 刻画了苏 203 井区马五₅ 白云岩储层含气有利区的平面展布。评价、落实了钻探有利目标, 取得了较好的效果。

关键词: 叠前反演; 白云岩储层; FFP 分析; 含气概率; 孔隙度; 含气饱和度

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2014)06-1164-08

鄂尔多斯盆地奥陶系按照储层类型及成藏特征可划分为上、中、下三套成藏组合, 围绕东部灰岩盆地呈环带状分布。奥陶系地层自东向西逐渐剥蚀, 在马五₅ 地层剥露区附近发育粉晶白云岩储层, 与上古生界煤系烃源直接接触形成供烃窗口, 受东侧灰岩或者区域沟槽充填遮挡, 形成大型的滩相白云岩岩性气藏^[1], 近年完钻的苏 203、苏 345 井在马五₅ 段获得百万方高产, 揭示出陕北黄土塬奥陶系中组合白云岩气藏具有较大的勘探潜力^[2-3]。钻井及地质分析表明, 研究区中组合白云岩分布范围广, 但有效储层厚度薄, 气藏控制因素和气水关系复杂, 白云岩气藏非均质性强, 岩性识别困难, 而高产富集区主要受白云岩的物性控制。研究区黄土塬地表条件复杂, 奥陶系地震成像质量差^[4], 且主力储层马五₅ 地震储层预测难度大, 主要表现为灰岩与白云岩在纵波阻抗上存在较大重叠区间, 叠后地震反演得到的纵波阻抗资料无法有效的区分储层与非储层, 而叠前地震包含了大量的弹性参数信息, 从而使反演获得的岩性、物性信息更加丰富, 经过多年的研

究与应用, 在多个油田已经见到了喜人的效果^[5-9]。

基于此, 笔者充分利用苏 203 井区 600 km² 黄土塬三维高保真地震资料, 以岩石物理分析结果为储层预测理论依据, 开展了叠前地震反演, 并在此基础上, 应用完钻井弹性参数之间的关系, 拟合出孔隙度与纵波阻抗、含气饱和度与泊松比的函数关系式, 结合叠前反演结果, 计算得到研究区马五₅ 地层的孔隙度和含气饱和度; 创新应用 FFP(岩相流体概率)分析技术, 得到白云岩概率体和含气概率体, 并解决了泥岩不能区分的难题。最后, 综合含气概率体、孔隙度和含气饱和度, 综合评价、落实了有利的钻探目标。

1 岩石物理敏感因子分析

岩石物理敏感因子分析的任务是要寻找各种弹性参数与储层特性(岩性、物性、含油气性)之间的关系, 它是弹性参数和储层特性的桥梁和纽带, 是叠前地震研究中不可或缺的关键环节^[8]。

根据工区内苏 345、苏 352 等有横波资料的井,

分析、提取工区地球物理参数,进行横波拟合,计算得到 11 口井的纵波阻抗、横波阻抗、纵横波速度比、泊松比、拉梅阻抗、剪切阻抗等弹性参数。通过具有相对独立意义的参数交会发现:虽然岩性边界有些重叠,但在趋势上还有一定的可分性,其中,剪切阻抗 $>84 \text{ Gpa} \cdot \text{g/cc}$ 时,可以认为是白云岩;泊松比 $<$

0.24 时,可以将致密白云岩(不含气)和灰岩剔除,但是无法将泥岩和含气白云岩区分开(图 1)。在后续的研究中,将会通过 FFP 分析技术将泥岩区分开,得到含气白云岩。这些敏感参数的确定为后续的叠前反演和储层预测奠定了理论依据^[10-11]。

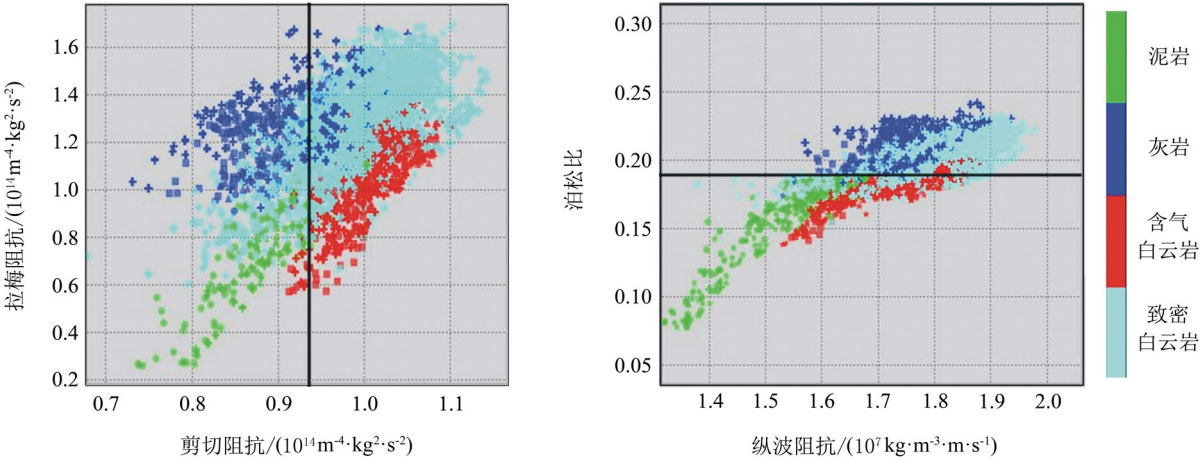


图 1 苏 203 井区马₅ 岩石物理敏感因子分析

2 叠前反演

2.1 反演过程质控

高质量的叠前反演结果是后续地震解释和储层预测的前提。而要想得到高质量的叠前反演结果,好的地震、测井资料是基础,中间每一步的质控过程,参数的选择是关键。因此先要对测井、地震资料进行质控。

对工区所用参与反演的 11 口井进行横波估算

和曲线标准化处理,将不同井同一类型同一地层的测井曲线校正到同一个值域范围,这样插值得到的低频阻抗模型是均匀的,不会出现“牛眼”异常现象。子波提取中,确保子波时窗为子波波长的 3~5 倍,主峰能量强、旁瓣对称且收敛,相位在 50 Hz 的有效频率范围内比较稳定。子波提取与时深标定迭代进行,反复调整,精细标定,确保井震相关系数达到 0.8 以上(图 2)。在此基础上,提取三个分偏移距的 AVO 子波。

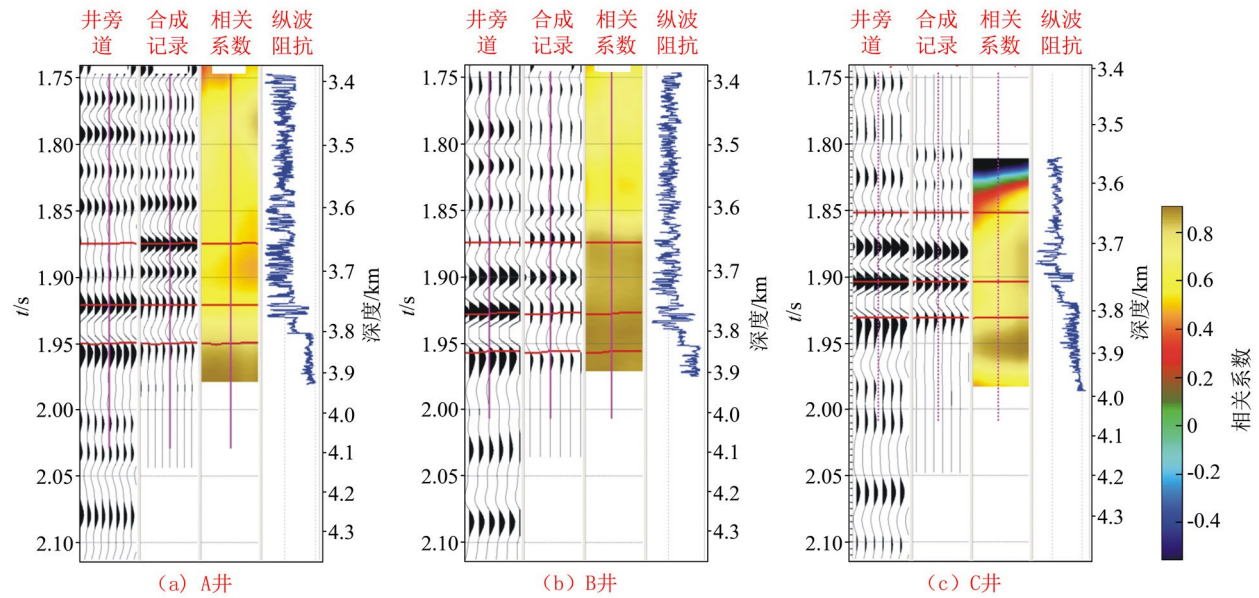


图 2 苏 203 井区子波提取与时深标定示意

地震处理中,往往由于各向异性、校正不到位等原因,得到的分偏移距叠加数据体通常相位一致性不是很好。直接用这样的地震数据来做叠前反演,很难得到高分辨率的反演结果,因此有必要对地震数据做相位一致性处理。研究中采用的技术是数据对齐,它是利用被对齐数据与标准数据(参考数据)在地震目标层位的相关性,对一个地震道计算一个对齐所用时间,并将对齐时间应用到被对齐数据,来

改善分偏移距叠加数据体的相位一致性。

图 3 是苏 203 井区做相位一致性处理前后的对比剖面,很明显,处理后的分偏移距叠加数据体相位一致性得到了很大的改善。

对于马五₅ 这种较平的地层,选择中偏移距叠加数据(与井相关系数最好)和对应的 AVO 子波,采用平行于顶底的方式建立低频模型,并在后面的反演过程中,进行严格的反演参数质控。

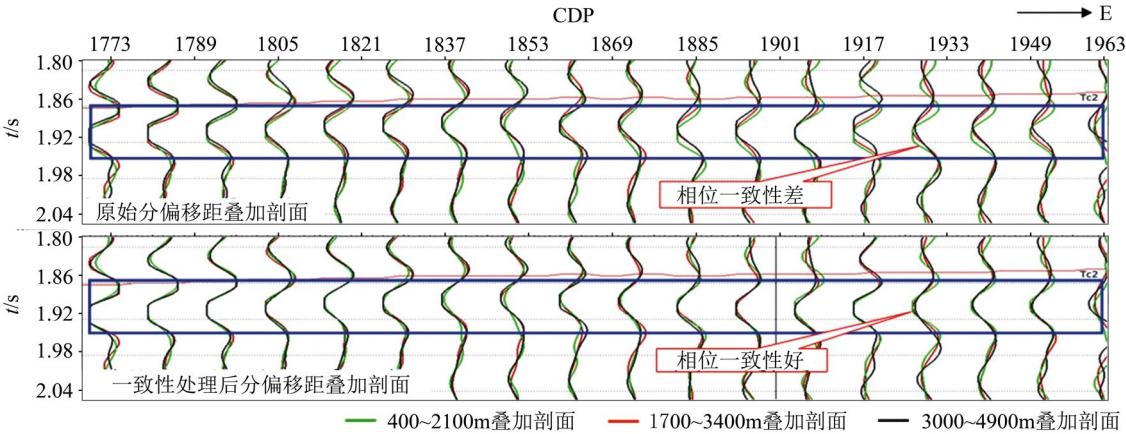


图 3 苏 203 井区相位一致性处理前后对比剖面

2.2 反演结果质控

反演结果的质量直接影响到后续的地震解释和储层预测,可以分别利用提取伪井曲线、在剖面上利用反演的合成记录与原始地震道的对比、在平面上利用地震数据与反演的合成记录的相关性和反演信噪比来进行对比等 3 种方法来质控反演结果。

图 4 是利用伪井曲线质控反演结果的示意图,可以看到,在目的层段反演结果与原始井曲线匹配较好。

在反演得到各弹性参数体后,选择 S1-S5 共 5

口储层差异较大的井作为反演结果的质控井,在叠前剪切阻抗和泊松比反演剖面上(图 5)可以看出, S2 和 S3 井剪切阻抗较高,说明 S2 及 S3 井马五₅ 段白云岩较发育,同时泊松比表明储层物性好。测井解释 S2 井马五₅ 地层厚度 17 m,白云岩厚 14 m,有效储层 8.5 m; S3 井马五₅ 地层厚度 24 m,白云岩厚 19.5 m,有效储层 14.8 m; S1、S4、S5 井剪切阻抗及泊松比属性显示其白云岩欠发育,储层物性差。实际完钻 S1 井马五₅ 白云岩厚 5.8 m,有效储层 3.9 m; S4 井白云岩厚 2.4 m,有效储层厚 2.8 m; S5 井马

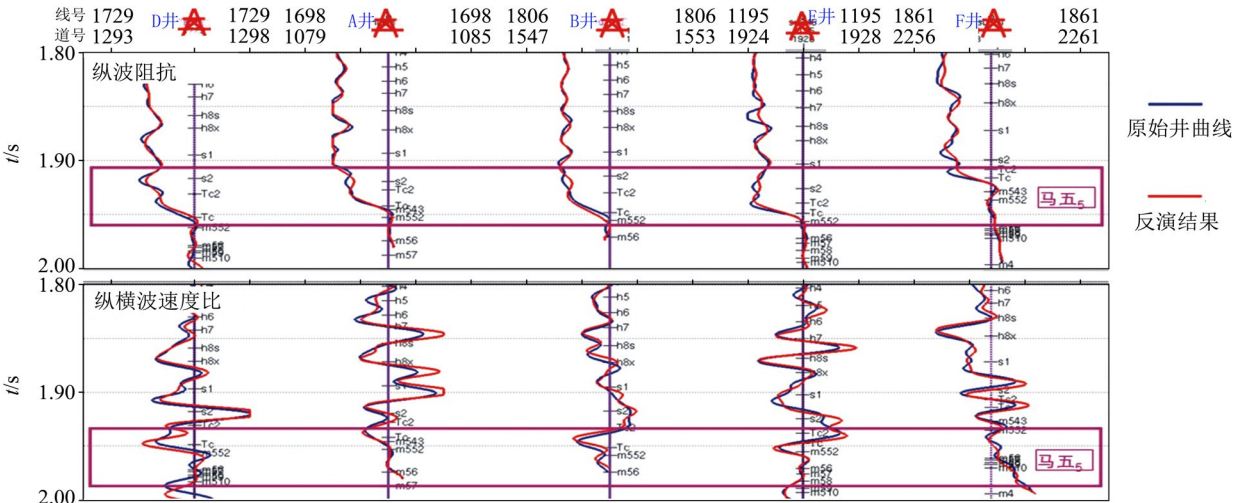


图 4 苏 203 井区伪井曲线质控反演结果示意

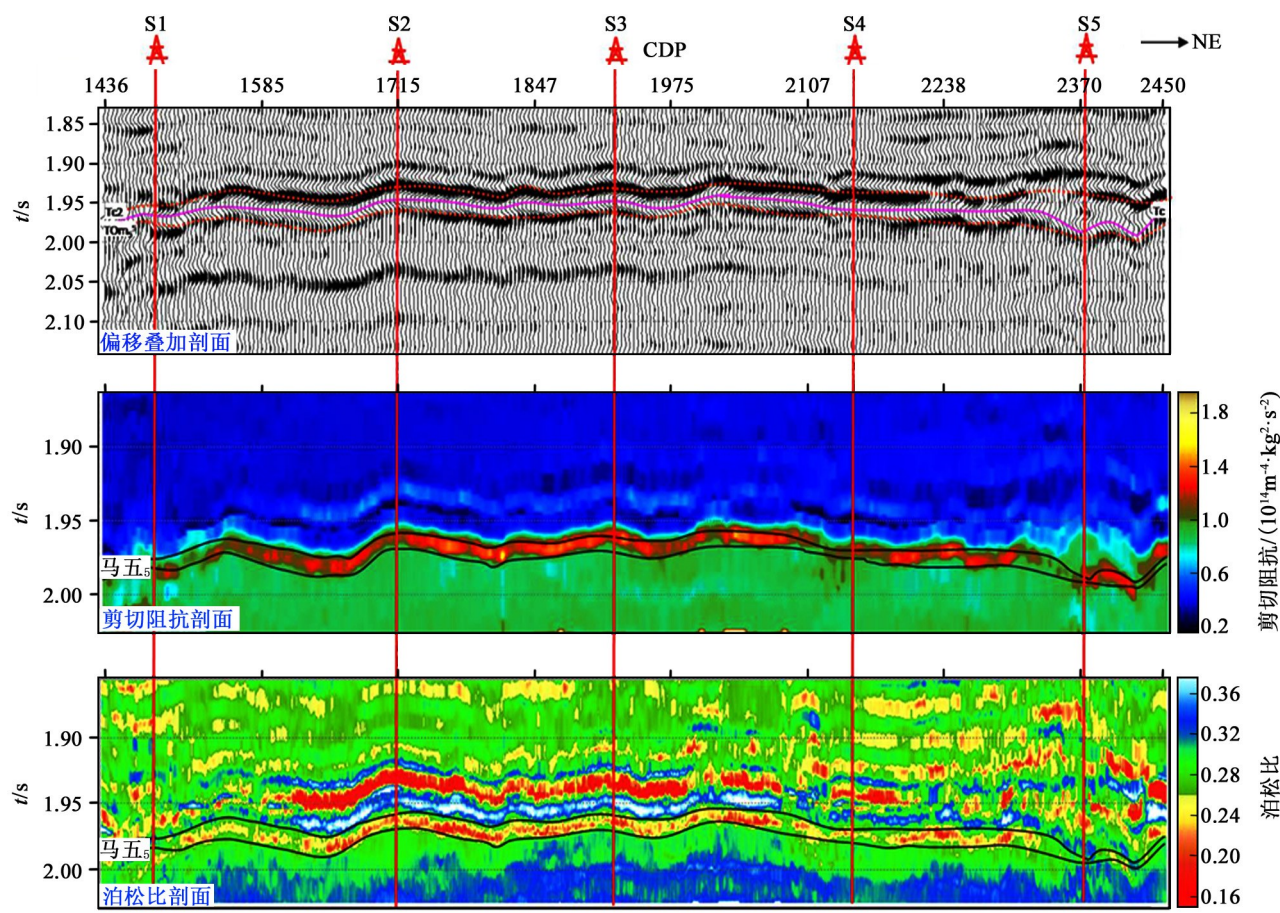


图 5 S1-S2-S3-S4-S5 连井叠前反演剖面

五₅ 地层缺失。5 口井的钻井情况均与反演结果吻合较好,说明该反演结果是可靠的。

3 基于叠前反演的储层预测技术研究

在严格质控的基础上,得到了可靠的反演结果。岩石物理分析表明,剪切阻抗可以识别白云岩体,泊松比小于 0.24 的地质体可以认为是泥岩和含气白云岩的混合物。接下来,将在叠前反演结果的基础上,通过 FFP 分析技术来解决泥岩和含气白云岩不可分的问题;另外,通过拟合公式来计算马五₅ 储层的孔隙度和含气性,综合预测、评价含气有利区。

3.1 FFP 分析

FFP (岩相流体概率)分析技术是通过把岩石物理和概率相结合,在对多种岩性和含流体类型条件下测井弹性属性的分布特征进行综合研究的基础上,定义各种岩性的弹性属性的概率密度函数,然后应用贝叶斯模糊判别分析技术,将叠前反演得到的弹性参数成果转换成各种指定类型岩性的空间分布概率,得到一个直接的、具有明确地质意义的储层岩相三维空间分布结果^[12]。该技术的应用,将叠前反演结果向地质成果转化,可以得到直观的地质结果,

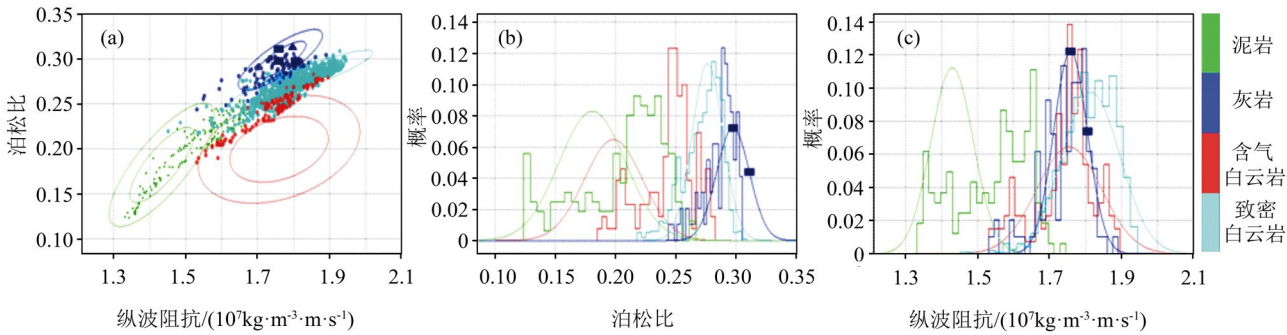
有助于地震地质研究的结合。

研究中,将工区马五₅ 地层的岩相流体类型分为含气白云岩(有效储层)、致密白云岩(非有效储层)、灰岩和泥岩 4 种,根据钻井和测井解释成果,详细划分工区 11 口井的目的层段的岩性,通过交会分析,建立 4 种岩性与纵波阻抗及泊松比之间的关系,并根据测井分析结果建立、调整和编辑 4 种岩相的概率密度函数(图 6),然后与叠前反演得到的纵波阻抗和泊松比数据体,定量预测地震各岩相的概率分布。

这样就可以分别得到泥岩、灰岩、致密白云岩、含气白云岩的概率体。但是概率体只是事件存在可能性的概率大小,并不是唯一确定的,为了提高储层预测的符合率,需要进一步结合 FFP 分析的结果和叠前泊松比反演的结果来预测含气性。含气层性质(L)可通过泊松比(P)和含气概率(w_{gas})的逻辑关系来得到:

$$L = (P < 0.24) \wedge (w_{\text{gas}} > 0.8)。$$

$L=1$ 表示含气白云岩, $L=0$ 表示其他岩性或流体。也即,若满足条件:泊松比小于 0.24 且含气概率大于 0.8,则认为含气层为含气白云岩,否则就是其他



a—弹性参数交会示意;b—各岩性泊松比分布概率直方图;c—各岩性纵波阻抗分布直方图

图 6 203 井区编辑概率密度函数示意

岩性或流体。

3.2 孔隙度和含气饱和度的计算

理论认为,岩石孔隙度的大小会影响纵波阻抗值^[13],含气饱和度与泊松比也有一定的关系^[14],因此可以利用工区完钻井的测井解释结果,建立孔隙度与纵波阻抗、含气饱和度与泊松比的函数关系式,并分别利用叠前反演得到的纵波阻抗和泊松比,应用拟合的函数关系式,来计算马五₅ 储层的孔隙度和含气饱和度。

图 7 是苏 203 井区拟合孔隙度和含气饱和度计

算公式的示意图,可以看到,孔隙度与纵波阻抗相关系数达到了 0.81,含气饱和度与泊松比相关系数达到了 0.88,且拟合的含气饱和度函数曲线与 brie 模型($e=2$)很相似。孔隙度可以由公式

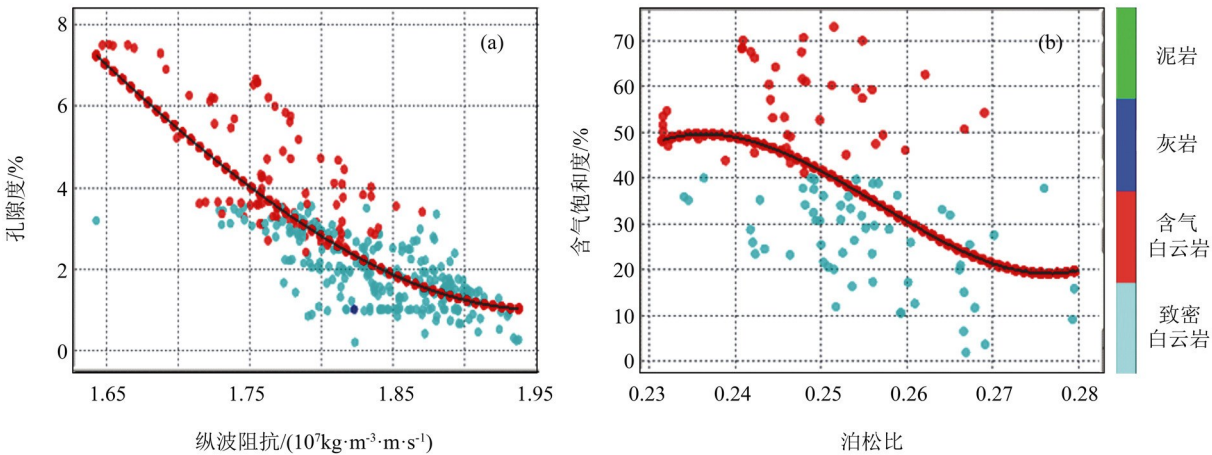
$$\phi = 5.22 \times 10^{-13} I^2 - 2.09 I - 209.88$$

求得。这里, ϕ 表示孔隙度, I 表示纵波阻抗,单位为 $\text{m}^{-2} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}$ 。

含气饱和度可以由公式

$$S_g = (9.23P^3 - 7.11P^2 + 1.81P - 0.15) \times 10^5$$

求得。这里, S_g 表示含气饱和度, P 表示泊松比。



a—交会拟合孔隙度计算公式示意;b—交会拟合含气饱和度计算公式示意

图 7 203 井区交会拟合孔隙度与含气饱和度计算公式示意

将孔隙度的拟合公式保存为 $K(x)$,含气饱和度的拟合公式保存为 $H(x)$,并分别应用到叠前反演得到的纵波阻抗和泊松比,就可以得到马五₅ 储层的孔隙度和含气饱和度。

图 8 是过 S1-S2-S3-S4-S5 连井孔隙度、含气概率、含气饱和度的剖面。用以上方法求得的孔隙度和含气情况在 5 口井中得到了较好的验证。

图 9 是苏 203 井区马五₅ 储层综合评价,其中孔隙度和含气饱和度是使用式(1)计算得到的,有效储层是联合含气概率体和叠前反演泊松比数据体得到的。综合孔隙度、含气饱和度以及有效储层分布图,圈定了苏 203 三维工区的含气有利区(图中红色曲线范围内)。工区内 42 口完钻井,验证地震储层预测符合率达到 80.9%。

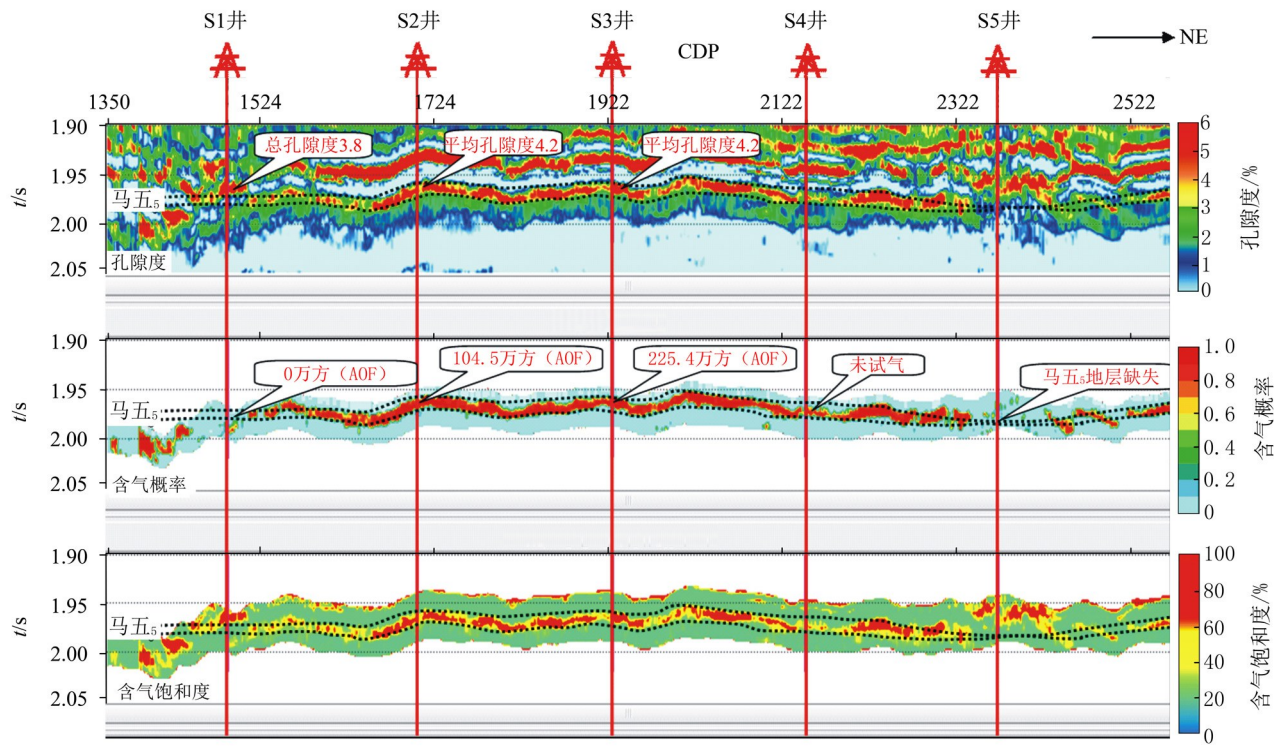
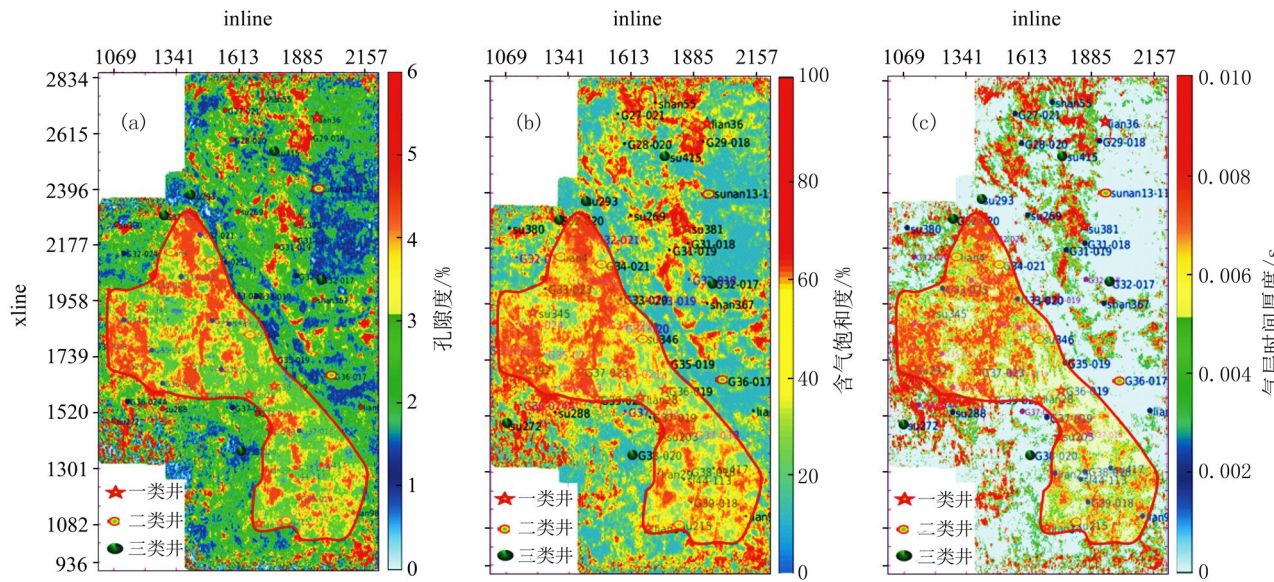


图 8 203 井区过 S1-S2-S3-S4-S5 连井物性和含气性剖面



a—孔隙度;b—含气饱和度;c—气层时间厚度

图 9 203 井区马五_s 储层综合评价

4 应用实例

在生产井位部署中,依据圈定的马五_s 含气有利区,建议并被采纳的 S 井(图 10),地震预测出露

层位马五₃,马五_s 储层 18 m;实钻出露层位马五_s,储层 17 m,气层 5 m,含气层 3.5 m,试气 104.5×10⁴/m³(AOF)。叠前地震储层预测得到了较好的应用效果。

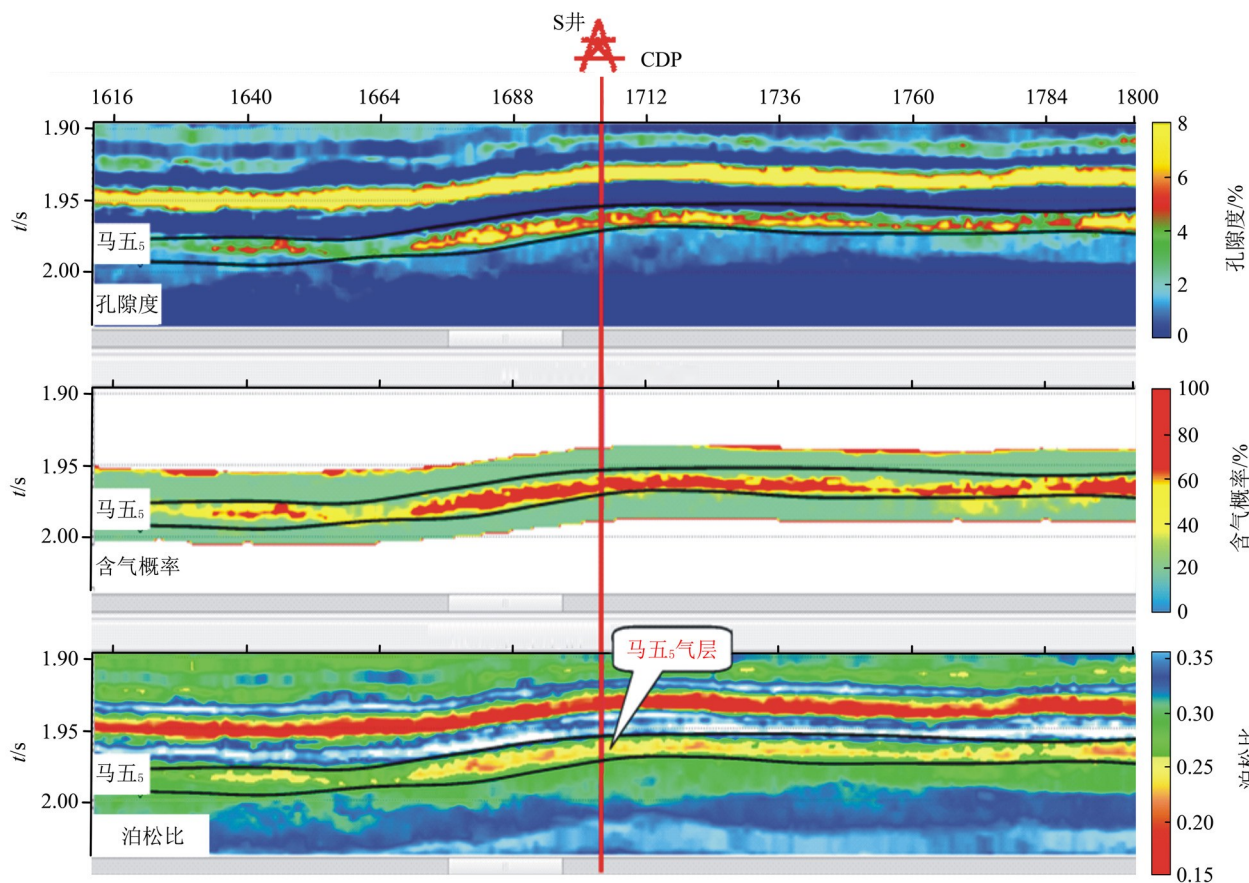


图 10 苏 203 井区 S 井叠前储层预测剖面

5 结论

结合近年在陕北黄土塬苏 203 井区实施的三维高保真地震资料,在强化岩石物理分析的基础上,进行了严格质控下的叠前反演,在此基础上,创新应用 FFP 分析技术,解决了泊松比小于 0.24 不能将泥岩区分开的难题,并利用拟合公式的方法计算了马五₅储层的孔隙度和含气饱和度,评价了目的层的物性和含气性,得到了苏 203 井区马五₅白云岩储层综合评价图,圈定了马五₅含气有利区,在实际生产中,得到了较好的应用效果。研究过程中,得到以下结论。

(1)叠前反演是储层预测的基础,因此必须加强叠前反演过程和结果每一个步骤的质控,确保可以获得高质量的叠前反演结果;

(2)叠前反演得到的是地球物理弹性参数,在此基础上,进一步进行储层信息挖掘,就可以得到能直观的表征储层的物性、含气性等特征的参数,能更好地发挥叠前反演在储层预测中的重要作用;

(3)对于苏 203 井区马五₅白云岩储层,剪切阻抗能够识别白云岩体,叠前反演得到的泊松比结合

FFP 分析得到的含气概率体,能较好地预测有效储层,计算得到的孔隙度和含气饱和度可以与之相互印证,进一步提高了储层预测的精度。

参考文献:

- [1] 杨华,王宝清,孙六一,等.鄂尔多斯盆地古隆起周边地区奥陶系马家沟组储层影响因素[J].岩性油气藏,2013,25(3):9-16.
- [2] 杨华,包洪平.鄂尔多斯盆地奥陶系中组合成藏特征及勘探启示[J].天然气工业,2011,31(12):1-10.
- [3] 付金华,魏新善,任军峰,等.鄂尔多斯盆地天然气勘探形式与发展前景[J].石油学报,2006,27(6):1-4.
- [4] 程建远,李宁.黄土塬区地震勘探技术发展现状综述[J].中国煤炭地质,2009,21(12):73-75.
- [5] 轩义华,秦成岗,汪瑞良,等.三维叠前同步反演技术在番禺天然气区的应用[J].石油物探,2010,49(3):257-267.
- [6] 郎晓玲,彭仕宓,康洪全,等.叠前同时反演方法在流体识别中的应用[J].石油物探,2010,49(2):164-169.
- [7] 李艳玲.AVO 叠前反演技术研究[J].大庆石油地质与开发,2006,25(5):103-105.
- [8] 李凌高,甘利灯,杜文辉,等.叠前地震反演在苏里格气田储层识别和含气性检测中的应用[J].天然气地球科学,19(2):261-265.
- [9] 王维红,林春华,王建民,等.叠前弹性参数反演方法及其应用

[J].石油物探,2009,48(5):483-492.

[10] Connolly P. Elastic impedance[J]. The Leading Edge, 1999, 18(4):438-452.

[11] 张盟勃,史松群,潘玉.叠前反演技术在苏里格地区的应用[J].岩性油气藏,2007,19(4):91-94.

[12] 晏信飞,曹宏,姚逢昌,等.致密砂岩储层贝叶斯岩性判别与孔隙流体检测[J].石油地球物理勘探,2012,47(6):945-950.

[13] 李艳华,楚泽涵.含气层纵波声速与孔隙度、泥质含量和含水饱和度的关系[J].测井技术,2000,24(3):183-187.

[14] 潘仁芳.AVO 的内涵与外延[J].石油天然气学报,2006,28(2):50-55.

The application of the technology based on pre-stack inversion to reservoir prediction in the dolomite gas reservoir of the Northern Shaanxi loess tableland

CAI Ke-Han,ZHANG Meng-Bo,GAO Gai,LIU Feng,DU Guang-Hong,XU Lei-Ming
(Exploration and Development Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company,Xi'an 710021,China)

Abstract: In recent years, a large number of dolomite lithologic gas reservoirs have been found in the middle part of Ordovician strata in the Shanbei loess tableland. Nevertheless, the surface conditions of this area are complex, which leads to a poor seismic data imaging accuracy, and the main reservoir Mawu5 Formation of Ordovician is characterized by extensive distribution,thin reservoir,strong heterogeneity and drastic lateral variation in physical properties, which results in more difficulties in seismic prediction. With the 3D high-fidelity seismic data of 600 km² collected in the Shanbei loess tableland in recent years, technologies of FFP analysis and function formula between the elastic parameters fitted by drilled wells were applied innovatively based on an analysis of rock physical sensitive factors and the strengthening of pre-stack inversion. The dolomite probability, gas probability, porosity and gas saturation of Ma55 Formation in the project was calculated. The favorable gas area in the dolomite reservoir of Ma55 in the Su203 well district was described clearly, and then the favorable drilling targets were evaluated and obtained, thus achieving good results.

Key words: pre-stack inversion;dolomite reservoir;FFP analysis;probability of gas;porosity;gas saturation

作者简介: 蔡克汉(1987-),男,湖北阳新人,助理工程师,2010年毕业于长江大学勘查技术与工程专业,本科,在长庆油田分公司勘探开发研究院从事地震解释与地质综合研究工作。