

文章编号: 0253-9985(2009)03-0357-06

多波地震联合反演预测相对优质储层 ——以川西深层致密碎屑砂岩为例

叶泰然¹, 付 顺², 吕其彪¹, 赖未蓉¹

(1 中国石油化工股份有限公司 西南分公司 石油勘探开发研究院 德阳分院, 四川 德阳 618000)

2 成都理工大学, 四川 成都 610059)

摘要: 川西深层上三叠统须家河组四段发育三角洲致密碎屑砂岩, 砂体厚度大, 但含气较好的相对优质储层厚度薄。相对优质储层与作为围岩的致密砂岩和泥岩波阻抗较为接近, 利用常规地震方法很难预测该类优质储层分布, 而且预测精度差。利用 3D3C 勘探优势, 开展纵波及转换横波联合反演, 在储层岩石物理参数敏感性分析基础上, 采用“砂中找砂”的预测思路, 优选泊松比、P 波阻抗多波属性数据体, 采用多体交会解释手段, 剔除泥岩和致密砂岩, 可较好地预测致密砂岩背景中相对优质储层的分布。

关键词: 多波地震联合反演; 优质储层预测; 致密储层; 须家河组; 川西深层

中图分类号: TE122.2 文献标识码: A

Application of multiwave joint inversion to the prediction of relatively high-quality reservoirs —an example from the prediction of deep tight clastic sandstone reservoirs in the western Sichuan Basin

Ye Tairan¹, Fu Shun², Lü Qibiao¹, Lai Weirong¹(1 Deyang Branch of Exploration and Production Research Institute, SINOPEC Southwest Oilfield Company,
Deyang, Sichuan 618000 China; 2 Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059 China)

Abstract Clastic sandstones of delta facies were developed in the fourth member of the Tertiary Xujiahe formation (T_3x^4) in the western Sichuan Basin and they are tight with low porosity and low permeability. The sandbodies are large in thickness but their gas-bearing reservoirs are thin. The wave impedance of these reservoirs is similar to the surrounding rocks—tight sandstone and mudstone. It is very difficult to accurately predict the distribution of these reservoirs using conventional seismic methods. Taking advantages of 3D3C exploration, we have carried out a joint inversion of P-wave and converted shearwave. Based on the analysis of petrophysical parameter sensitivity, we have proposed the idea of “recognize quality sandstone in sandstone”. The multiwave attribute data volume such as Poisson's ratio and P-wave impedance are selected for multi-volumes crossplot interpretation to recognize mudstone and tight sandstone. In this way the relatively high-quality reservoirs within tight sandstones can be accurately identified.

Key words multiwave joint inversion; prediction of high-quality reservoir; tight reservoir; Xujiahe Formation; deep formation in the western Sichuan Basin

上三叠统须家河组气藏是目前川西坳陷天然
气勘探热点, 亦是储产量增长的主要层段。须家

河组埋深 3 000~6 000 m, 主力气藏为须二、须四
气藏, 储层为三角洲相砂岩, 孔隙度一般低于 5%,

收稿日期: 2008-12-10。

第一作者简介: 叶泰然 (1973—), 男, 博士, 高级工程师, 地震地层学与石油地质学。

渗透率普遍低于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 属典型致密碎屑岩储层, 储层非均质性强, 致密背景中发育孔隙度 5% ~ 10% 的优质储层。在上世纪中叶至今的须家河组气藏勘探过程中, 在埋深相对较浅、物性相对较好的川西坳陷北段发现中坝、八角场气田, 南段发现平落坝、邛西气田, 埋深相对较大的川西坳陷中段亦先后发现合兴场、新场等须家河组气田。2000年, 在新场气田上三叠统须家河组成功钻获 X851 和 X856 井, 无阻流量超过 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 稳定产量近 $40 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气井, 展现了川西深层致密砂岩气藏广阔的勘探开发前景。但气藏特征复杂^[1, 2], 勘探难度极大, 其后在同一构造带上部署的多口深井效果并不理想。

前期在川西新场地区, 针对深层须家河组致密砂岩储层, 利用基于 P 波地震资料的地震多属性分析、波阻抗反演、GR 拟声波反演等多种传统的常规储层预测方法进行了砂体分布预测, 取得了一定效果^[3, 4], 但储集物性相对较好的相对优质储层波阻抗值虽然低于致密砂岩, 却与作为围岩的泥岩接近, 隐蔽性强, 预测难度极大, 优质储层预测一直是困扰该区须家河组气藏勘探开发的技术瓶颈。

多波地震勘探是进行隐蔽油气藏勘探的一种非常有潜力的手段, 被许多国内外石油和地球物理公司列为技术跟踪对象。弹性纵波在地下传播过程中, 在有物性差异的地层分界面上除了产生反射纵波, 还产生转换横波。纵波信息是地下地层骨架、孔隙、孔隙流体、地温和压力特征的综合反映, 而横波则只与地层的骨架、孔隙度、温度和压力有关, 与孔隙流体性质无关。因此, 综合转换横波和纵波的地震信息, 预测储层特别是储集性较好的优质储层乃至含气性储层比单纯利用纵波信息更加有效。其主要应用范围包括气云屏蔽、岩性屏蔽成像、裂隙预测、砂泥岩储层预测和流体识别等^[5, 6]。

考虑到多波地震资料在致密气藏勘探开发中的优越性, 2005年在川西坳陷中段新场气田主体部位实施了 3D3C 多波地震勘探, 其目的是为了利用多波地震资料在解决复杂气藏地质问题方面的优势, 推动该区陆相深层须家河组气藏的勘探开发。近 2 年来, 伴随以多波多分量勘探为代表的地球物理储层识别及预测技术攻关多项研究成果的取得, 该项勘探技术在须二段气藏裂缝预测方

面发挥了重要作用^[7, 8], 所部署的钻井成功率明显提高。

1 储层特征

1.1 储层地质特征

川西坳陷上三叠统须(家河组)三段、五段为烃源发育层段, 以有机质含量极高的湖沼相泥质沉积为主, 夹于其间的须二段、须四段为主要储层发育段。文中拟讨论的川西新场地区须四段埋深 3 000 ~ 4 000 m, 岩性主要为岩屑石英砂岩、富钙岩屑砂岩、页岩、砾岩, 以三角洲前缘水下分流河道、河口坝沉积为主。须四段可分为上、中、下 3 个亚段, 上亚段以砂岩为主, 中亚段以泥岩为主, 下亚段以砂砾岩为主。根据新场地区 12 口井共计 999 个样品的孔渗数据来看, 须四段孔隙度最小值仅为 0.47%, 最大值可达 12.71%; 渗透率最小值仅为 $0.001 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$, 最大值可达 $0.86 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。物性最好的是须四上亚段砂岩, 其孔隙度最大值达 12.71%, 平均值为 6.21%; 其次是下亚段, 孔隙度平均值为 3.27%; 中亚段最致密, 孔隙度平均值小于 2%。须四储层随着孔隙度增大渗透率有变好的趋势, 但孔渗关系一般。总的来看, 新场须四储层物性较差, 属于典型的低孔、低渗储层。

综合国内外各种致密砂岩气藏的勘探经验, 优质储层的分布规律研究始终占据重要地位。“优质储层”是一个相对的概念, 在致密砂岩领域, 是指在普遍低孔隙度、低渗透率储层中发育的物性相对较好的有效储层。优质储层的孔隙度和渗透率值没有一个固定范围, 根据研究区储层中含油气性及产油气状况而定, 在鄂尔多斯苏里格庙气田, 优质储层一般指孔隙度大于 6%, 渗透率大于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储集层; 在四川盆地川中地区须家河组储层评价中, 将孔隙度大于 8%, 渗透率大于 $0.5 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层称为优质储层; 而在鄂尔多斯陕北地区延长统长 6 储层中, 将孔隙度大于 10%, 渗透率大于 $1.0 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层定为优质储层。与国内外相对比, 川西坳陷深层优质储层的孔渗条件最差, 且针对不同层位相对优质储层的物性标准也不一致, 一般把须二段中孔隙度大于 4%、基质渗透率大于 $0.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$; 须

四段中孔隙度大于6%、基质渗透率大于 $0.06 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的储层称之为相对优质储层,只有钻遇这类储层才能获得较高的工业产能。

1.2 储层地球物理特征

波阻抗是决定储层地震响应特征的主要因素,而地震波在岩石中的传播速度和岩石密度决定波阻抗的大小,因此,首先需要把握目标储层与围岩波阻抗与本区最能反映岩性的GR(自然伽马)之间的关系,波阻抗值可以通过测井获得的密度、声波时差换算获得。将典型井X851须四段厚度大于10m的所有砂岩段、典型泥岩段进行GR-AC(声波时差),GR-AC,GR-波阻抗交会分析,结果表明须四段砂岩GR值一般低于75API高于该值为泥岩。与泥岩波阻抗值相比,砂岩中波阻抗值具有明显的三分性,存在高、中、低3类波阻抗特征,波阻抗值范围分别对应9500~10500,10500~13500,13500~17000 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。其中,中等波阻抗砂岩与作为围岩的泥岩波阻抗值相当(图1)^[9]。

从须四段钻井储层评价成果及油气显示来看,新场地区物性最好、油气显示最好的相对优质储层往往具有中-低波阻抗特征,其中中等波阻抗储层分布最为普遍,物性差、油气显示相对较差及不含气的超致密砂岩往往为高波阻抗特征,正是由于这种复杂波阻抗特征的存在,常规纵波波阻抗反演难以识别优质储层,因为泥岩也为低波阻抗。此外,GR拟声波反演砂体预测难度亦很大,

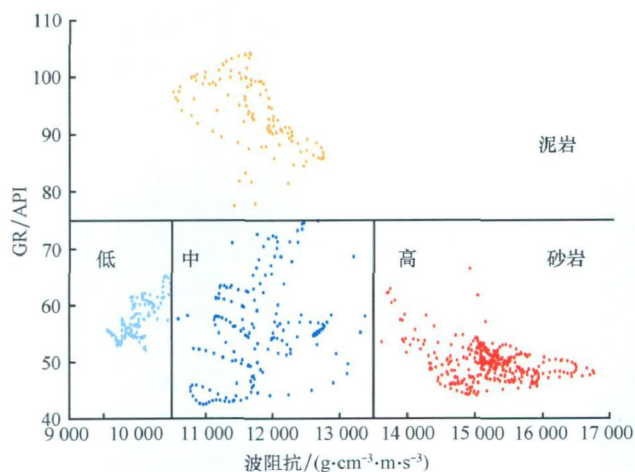


图1 须四段砂、泥岩GR与波阻抗交会图

Fig. 1 Crossplot of GR and wave impedance of sandstone and mudstone in T₃x⁴

因为同属须四段的砂岩,具有不同GR-AC的相关关系。可见,对于具有复杂地球物理特征的新场地区及相似地区的砂岩储层而言,基于纵波资料的常规方法准确预测砂岩及砂岩中的优质储层的纵横向分布难度极大。

2 多波地震联合反演预测相对优质储层

2.1 反演流程

目前,在缺少多波资料的勘探区,针对复杂地球物理特征砂岩储层预测,较为严谨的方法是基于岩石物理建模的P波AVO叠前反演与地质统计学反演^[10-11],该类反演方法主要是利用纵波的AVO特性,通过Aki-Richard近似求解出横波信息,利用岩石物理模板实现储集参数量化预测,由于该方法带有一定的近似和假设,且横波信息为计算所得,预测可靠性难以保证。实践表明,其预测精度受钻井勘探程度影响较大。而多分量勘探能够直接获得横波信息,利用PP波和PS波联合反演获得的结果应更加真实可靠。

众所周知,反演根据地震资料的不同分为叠前反演和叠后反演。叠后反演是指对常规水平叠加数据的反演,即零偏移距地震数据的反演。叠前反演是指对非零炮检距地震数据的反演。本次采用目前较为成熟、工业化程度相对较高的PP/PS波叠后联合反演方法。由于该反演方法是根据反射同相轴逐个样点进行的,因此,纵波与转换波同相轴匹配质量如何是反演结果可靠性的关键因素。进行纵横波联合反演之前,需要在叠后资料的基础上,对纵波与转换波地震数据进行必要的预备处理。预处理的主要任务就是实现纵波与转换波地震资料在时间域内的匹配处理,获得Gamma体。主要步骤包括:时间匹配、能量匹配和波形匹配。在时间域内,进行纵波与转换波地震记录同相轴匹配处理时所涉及的核心问题包括:①消除纵波与转换波地震反射响应的旅行时差;②消除处理后的纵波与转换波的相位差;③消除纵波与转换波的频率成分的差别。本次解决纵波与转换波反射同相轴匹配问题采用目前较为通用的局部标定方法,即对目标层附近相关性较好的纵波与转换波同相轴进行匹配。

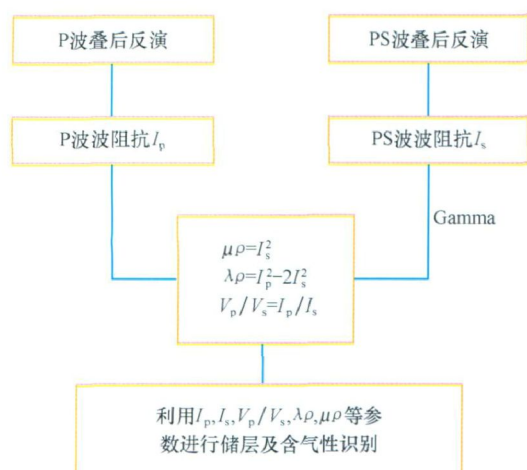


图 2 PP/PS波叠后联合反演流程

Fig. 2 Flow chart of PP/PS post-stack joint inversion

PP/PS波叠后联合反演是按常规的叠后反演方法分别进行纵波和横波叠后反演,获得 PP波波阻抗和 PS波波阻抗,然后通过 PP波波阻抗和 PS波波阻抗计算泊松比、纵横波速度比等储层参数。其反演的基本原理、流程与常规的叠后反演方法相同(图 2),其实现过程基本与常规的阻抗反演过程一样,分别标定 PP波剖面 and PS波剖面,提取单独的子波,在测井约束下,单独反演 PP波阻抗和 PS波阻抗后,利用匹配处理得到的 Gamma 体(地震剖面压缩因子)将 PS阻抗压缩到与 PP阻抗对应的时间剖面,得到可匹配解释的 PS阻抗体(图 3)。

反演得到纵横波阻抗体之后,利用 QC 工具对反演结果同测井结果对比,反演结果与测井结果数据分布范围和偏差基本一致时,反演结果才可用于后续储层预测。

反演得到纵波阻抗 I_p 、横波阻抗 I_s 的同时,可以计算得到与储层孔隙和孔隙流体敏感的 $\lambda\rho$ $\mu\rho$

V_p/V_s 、泊松比等参数,用于储层横向预测。

2.2 PP/PS波联合反演预测含气砂岩储层

2.2.1 多波属性储层敏感性分析

纵横波联合反演技术可获得纵波速度 V_p 、横波速度 V_s 、纵横波速度比 V_p/V_s 、泊松比 σ 、密度 ρ 、拉梅常数 λ 、剪切模量 μ 等参数。这些岩石物理参数有的与岩石骨架特性有关,有些与储层中含流体的性质有关。岩石物理参数敏感性分析是多波属性储层预测的关键。分析的主要步骤为:通过测井储层储集参数计算与综合评价,识别优质储层,在此基础上,分析致密砂岩、相对优质储层、围岩岩石物理参数特征,筛选敏感参数或参数组合。

通过目标储层岩石物理多属性参数交会分析,认为多波地震反演获得及计算出的纵波速度 V_p 、横波速度 V_s 、 V_p/V_s 、纵波阻抗 I_p 、横波阻抗 I_s 、拉梅常数 λ 、剪切模量 μ 、泊松比等诸多参数中,纵波阻抗 I_p 、 V_p/V_s 、泊松比对优质储层最为敏感,或者说与其相关性大(图 4);其中,如前文所述,优质储层与致密砂岩纵波阻抗 I_p 差异大,可以利用纵波阻抗 I_p 排除致密砂岩陷阱。识别砂泥岩方面,泊松比及纵横波速度比较为敏感,比较而言,本区泊松比较纵横波速度比识别岩性更有效。图 4 为新场地区 5 口井须四段沙泥岩 GR 与泊松比及 V_p/V_s 交会分析对比结果,图中一方面可以看出,泊松比、 V_p/V_s 与 GR 线性相关均较为明显,但泊松比与 GR 线性关系最为明显,识别岩性应更有效;另一方面,图中还可以看出,泊松比与 GR 交会分析放大了优质储层与致密砂岩之间的差异,更利于区分致密砂岩、物性较好的相对优质储层与泥岩。

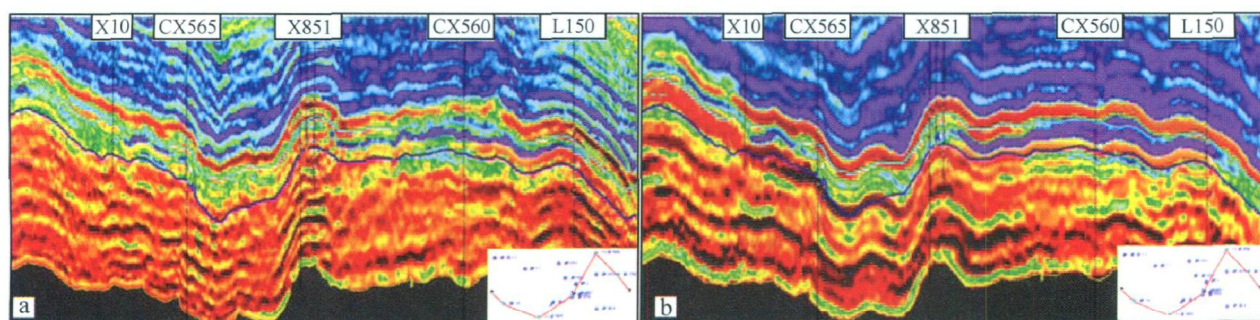


图 3 纵、横波叠后联合反演剖面

Fig. 3 PP/PS post-stack joint inversion profiles

(a. P波波阻抗剖面; b. PS波波阻抗剖面。红色为高值。)

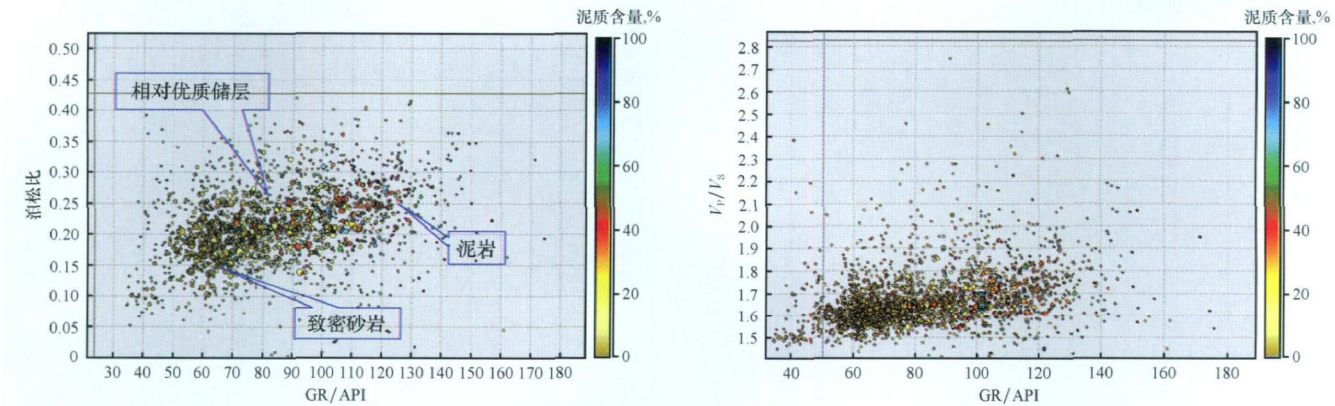


图 4 新场地区 5 口井须四段泊松比-纵横波速度比与 GR 交会图

Fig. 4 Crossplot of Poisson's ratio V_p/V_s and GR of $T_3^{4(3)}$ in five wells in the Xinchang area

总体而言, I_p 、泊松比均与孔隙发育程度及岩石骨架相关, 单一参数不能识别优质储层分布, 两种及以上参数联合才能解决本区优质储层预测问题。

2.2.2 地震多属性数据体联合优质储层预测

上述研究表明, 泊松比和 P 波阻抗数据体交会识别相对优质储层的有效手段。交会解释的主要思路是根据钻井优质储层识别成果, 以岩石物理参数交会分析为线索, 利用井约束多波地震联合反演获得的敏感岩石物理参数实现优质储层的预测。

以须四上亚段 $T_3^{4(3)}$ 砂体为例, 该套砂体厚 20~50 m, 纵向具有明显的非均质性, 并非整段砂

体都为优质储层, 其中孔隙度大于 6% 的相对优质孔隙型储层一般厚 10~30 m。图 5 为典型井 X851 须四上亚段泊松比与 P 波阻抗交会识别结果, 粉色曲线为波阻抗曲线, 橙色为 GR 曲线, 砂体内部波阻抗存在明显变化, 优质储层位于砂体中部, 具有中等-低波阻抗特征。通过 P 波阻抗与泊松比交会可以很好识别优质储层, 左图中圈定的岩石物理参数多边形区域对应右图测井曲线中的白色区域, 该区域与测井综合评价的优质储层——砂岩中的红色段对应好。图中可见, 须四段优质储层岩石物理参数特征具有“中-低泊松比、中-低波阻抗”特征, 泊松比一般低于 0.25 与泥岩有较明显差别; 泥岩泊松比为高值, 波阻抗值范围主要间于 $9\,000\sim13\,000\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,

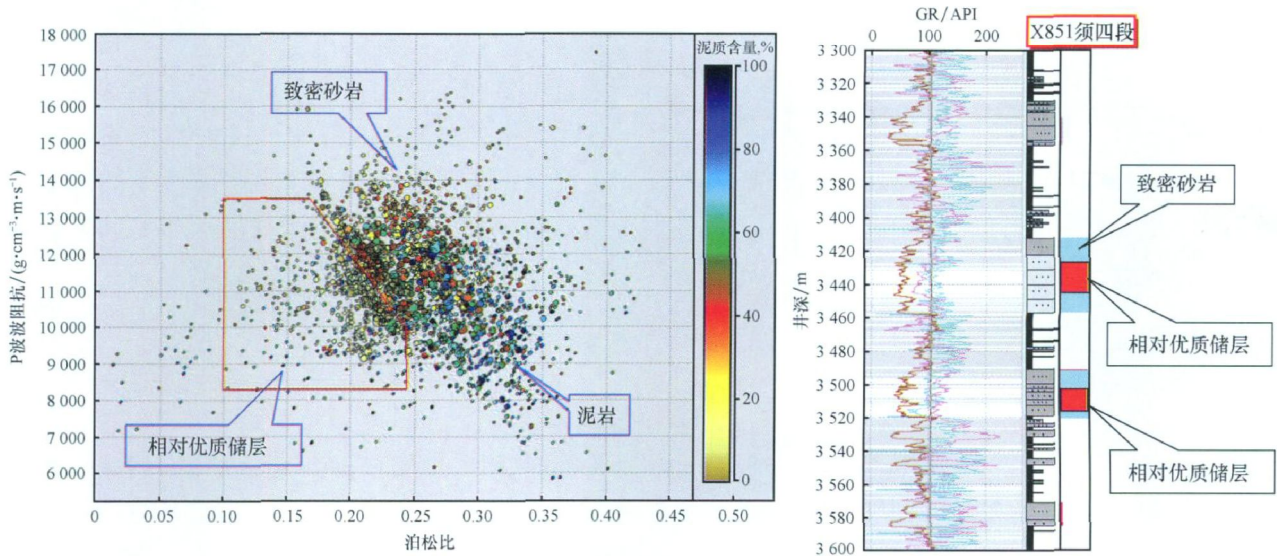


图 5 须四上亚段相对优质储层在泊松比与纵波波阻抗交会图中的分布

Fig. 5 Distribution of the relatively high-quality reservoirs in $T_3^{4(3)}$ on the crossplot of Poisson's ratio and P-wave impedance

虽然低于致密砂岩,但与泥岩重叠明显,这一特征与目前熟知的砂岩泊松比低于泥岩,孔隙砂岩波阻抗低于致密砂岩的经典理论研究获得的岩石物理特征相符。

由于有井约束,地震与测井相关性好,属性值范围统一,借助地震多体解释手段,可将钻井泊松比与纵波阻抗交会区内的相对优质储层在地震剖面中识别出来。所识别出来的砂岩储层满足交会区内的岩石物理参数特征,从而通过多波地震反演实现相对优质储层的横向预测。从须四连井反演剖面上看(图 6),地震识别的优质储层时间厚度的井间相对关系与钻井优质储层厚度关系吻合。通过各井优质储层层速度求取及厚度换算,获得优质储层分布厚度图(图 7)。图中可见,该套储层相对优质储层厚度一般低于 25 m; X851 井区优质储层最厚,分布较为稳定,一般 30 m;而 L150 井、CX565 井实钻砂体发育(30~40 m),优质储层仅 10 m 左右,反映出优质储层厚度横向变化明显。X851 井处于构造相对高部位,而 L150 井及 CX565 井构造位置较低,分析优质储层分布与构造部位有一定关系。此外,优质砂岩储层分布与前期 P 波 AVO 叠前反演预测的砂体分布宏观形态一致,物源来自北东方向,为三角洲前缘水下分流河道及河口坝,优质储层主要分布于主分流河道及河口部位,表明沉积作用对该类储层分布亦有重要影响,总体分析认为预测精度较高。利用多波属性,通过多体交会解释手段,更进一步较为客观地预测出了有效的相对优质储层分布及厚度,实现“砂中找砂”——即致密砂岩背景中预

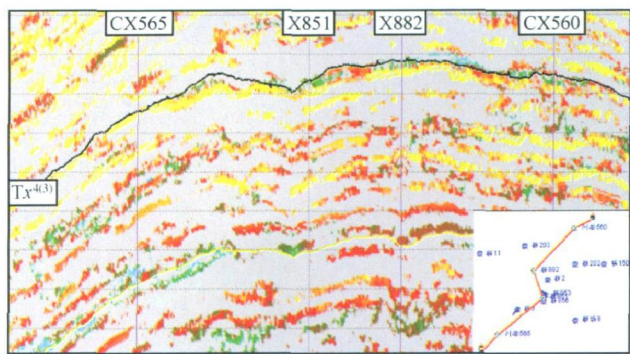


图 6 须四上亚段相对优质储层在连井 P 波波阻抗剖面上的分布

Fig. 6 Distribution of the relatively high-quality reservoirs in $T_3x^{4(3)}$ on well tie P-wave impedance profile

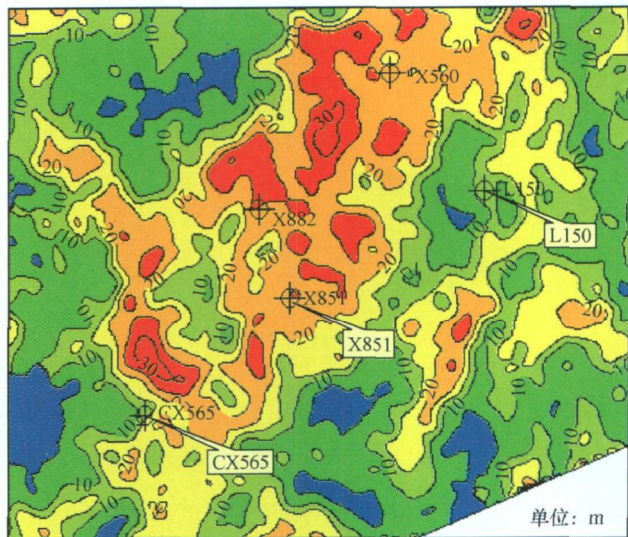


图 7 须四上亚段相对优质储层厚度

Fig. 7 The thickness of the relatively high-quality reservoirs in $T_3x^{4(3)}$

测相对优质储层,为解决该类优质储层预测技术瓶颈问题提供了新思路。

2.3 多波联合反演技术发展方向展望

由于实际的地震资料并非自激自收的地震记录,水平叠加必然会导致重要的 AVO 信息的丢失,用叠后资料作反演,在进行储层预测时,预测的精度和成功率会受到影响。比较而言,由于叠前地震资料含有丰富的振幅和旅行时信息,更能够克服叠后反演的不足,因此多波 AVO 叠前反演获得的岩性、物性信息更加丰富、可靠,基于各向异性介质理论的高精度 P 波和 PS 波叠前联合反演是反演技术发展的未来方向^[12 13]。虽然叠前反演技术目前工业化程度不高且多为方法研究和软件测试性质的,但随着计算机性能的不提高和叠前反演方法技术进步,计算量密集的多波叠前联合反演技术在未来的油气勘探中必将有广阔的应用前景。

3 认识与结论

1) 川西致密砂岩非均值性强,储层类型及波阻抗特征复杂, P 波属性预测难度较大,陷阱多,多波属性为该类优质储层预测创造了条件。通过多波地震联合反演得到了与储层岩性、储集性、含流

(下转第 369 页)

参 考 文 献

- 1 谷长春, 王为民, 郭和坤, 等. 现场岩屑核磁共振分析技术的实验研究 [J]. 波谱学杂志, 2002, 19 (3): 281~ 288
- 2 Wang W, Miao S, Liu W, et al Using NMR technology to determine the movable fluid index of rock matrix in Xiaoguai oil-field [A]. SPE 50903 1998
- 3 Borgi G C, Bortolotti V, Brancolini A, et al Developments in core analysis by NMR measurements [J]. Magnetic Resonance Imaging 1996 14 (7- 8): 751- 760
- 4 Timur A. Pulsed nuclear magnetic resonance studies of porosity, movable fluid and permeability of sandstones [J]. Journal of Petroleum Technology 1969 21 (6): 775- 786
- 5 陈志海, 马旭杰, 黄广涛. 缝洞型碳酸盐岩油藏缝洞单元划分方法研究——以塔河油田奥陶系油藏主力开发区为例 [J]. 石油与天然气地质, 2006 27 (6): 847~ 855
- 6 王光付. 溶洞型碳酸盐岩油藏高效开发实践——以塔河油田 11 区为例 [J]. 石油与天然气地质, 2008 29 (5): 703~ 708
- 7 康志江, 李江龙, 张冬丽, 等. 塔河缝洞型碳酸盐岩油藏渗流特征 [J]. 石油与天然气地质, 2005 26 (5): 634~ 640 673
- 8 李江龙, 黄孝特, 张丽萍. 塔河油田 4 区奥陶系缝洞型油藏特征及开发对策 [J]. 石油与天然气地质, 2005 26 (5): 630~ 633
- 9 Mendelsohn K. Magnetic relaxation in porous media [J]. Magnetic

- Resonance Imaging 1991, 9 (5): 651- 655
- 10 Straley C, Rossini D, Vinegar H, et al Core analysis by low field NMR [R]. SCA Conference Paper 9404 1994
- 11 Ramakrishnan T S A petrophysical and petrographic study of carbonate rocks [A]. SPE 49502 1998
- 12 Mai A, Kantzas A. An evaluation of the application of low field NMR in the characterization of carbonate reservoirs [A]. SPE 77401, 2002
- 13 王为民, 李培, 叶朝辉. 核磁共振信号的多指数反演 [J]. 中国科学 (A 辑), 2001, 31 (8): 730~ 736
- 14 Chang D. Effective porosity, producible fluid and permeability in carbonates from NMR logging [Z]. SPWLA, 1994
- 15 Miller M N, Paltiel Z, Glick M E, et al Spin echo magnetic resonance logging porosity and free fluid index determination [A]. SPE 20561, 1990
- 16 LaTorraca G A, Dum K J, Brown R J S Predicting permeability from nuclear magnetic resonance and electrical properties measurements [R]. SCA Conference Paper 9312 1993
- 17 Oswald E J Controls on porosity evolution in Thamanga Group carbonates [A]. SPE 29797, 1995
- 18 Freedman R, Heaton N. Fluid characterization using nuclear magnetic resonance logging [J]. Petrophysics 2004 45 (3): 241- 250

(编辑 李 军)

(上接第 362 页)

体性更为敏感的岩石物理参数, 为更高精度相对优质储层预测创造了条件。

2) 由于储层岩性、储集性、含流体变化等均会导致岩石物理参数的变化, 单一属性储层预测难度大。可以借助地震多属性体交会解释手段, 根据钻井储层识别结果, 在储层岩石物理参数敏感性分析基础上, 井震多属性联合预测优质储层分布范围, 并求取储层厚度。

3) 储层岩石物理参数敏感性分析, Gamma 体准确求取、多波联合反演质量控制是优质储层预测关键。纵横波叠前反演联合、多波多属性信息融合是致密储层预测的发展方向。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 邓少云, 叶泰然, 吕正祥, 等. 川西新场构造须家河组二段气藏特征 [J]. 天然气工业, 2008 28 (2), 42~ 45
- 3 郑荣才, 叶泰然, 翟文亮, 等. 川西坳陷上三叠统须家河组砂体分布预测 [J]. 石油与天然气地质, 2008 29 (3): 405~ 411

- 4 叶军, 陈昭国. 川西新场大型气田地质特征与预测关键技术 [J]. 石油与天然气地质 2006 27 (3): 384~ 391
- 5 石玉梅, 姚逢昌, 曹宏. 多波多分量天然气勘探技术的进展 [J]. 勘探地球物理进展, 2003 26 (3): 173~ 177
- 6 Cafarelli B, Matson E, Krail P, et al 3-D gas cloud imaging of the Donald Field with converted wave [Z]. Expanded Abstracts of 70th Annual Intematg 2000 1 158- 1 161
- 7 杨克明, 张虹. 地震三维三分量技术在致密砂岩裂缝预测中的应用 [J]. 石油与天然气地质, 2008 29 (5): 683~ 689
- 8 程冰洁, 徐天吉. 转换波资料在川西储层预测中的应用 [J]. 石油物探, 2009 48 (2): 181~ 186
- 9 叶泰然. 基于波形的波阻抗特征识别技术在川西气田储层预测中的应用 [J]. 石油物探, 2005 44 (6), 632~ 635
- 10 莫午零, 吴朝东. 裂缝性储层 AVO 模型研究 [J]. 天然气工业, 2007 (2), 27 (2): 43~ 45
- 11 赵邦六. 多分量地震勘探在岩性气藏勘探开发中的应用 [J]. 石油勘探与开发, 2008 35 (4): 397~ 40
- 12 朱成宏. 从 EAGE 第 66 届年会看多分量地震技术的新进展 [J]. 勘探地球物理进展, 2004 27 (4): 300~ 307
- 13 王贲, 腾殿波, 荆春颖. 多分量地震技术实用化的一些关键问题 [J]. 天然气工业, 2005 28 (3): 174~ 177

(编辑 董 立)