

四川盆地泸州地区页岩气地层地震相分析及实际应用

康 昆, 李文佳, 李鸿明, 王 梦, 周津宇, 赖 娟, 杨卫宁

中国石油集团东方地球物理勘探有限责任公司西南物探分公司, 四川 成都
Email: kangkun_sc@cnpc.com.cn

收稿日期: 2021年3月1日; 录用日期: 2021年6月23日; 发布日期: 2021年6月30日

摘 要

地震相就是在地震反射时间剖面上所表现出来的反射波的面貌。地震相分析研究是利用地震属性提取地震信息, 充分利用地震反射的内部结构, 外部形态, 结合振幅、频率、连续性等特点, 研究蕴含在地震反射波中的有关地震波的几何形态、运动学特征、动力学特征和统计学特征的信息, 能从多方面反映地下特殊地质现象、沉积现象、流体特征等, 地震相分析已成为精细储层描述的重要手段。对于四川泸州地区页岩地层, 虽然目前的地震分辨率还很难达到对单一小层的准确识别, 但三维地震属性分析可以客观地反映储层的差异性特征, 经过钻井标定和沉积相分析, 这种差异性在一定程度上体现了储层的非均质性特征, 反映了储层厚度的展布情况。均方根振幅(RMS)表示时窗内时间域能量(振幅平方)的平方根。用来显示孤立的或极值振幅异常, 其横向变化可以用于研究地层岩性变化、物性及含气性。均方根振幅属性对地层振幅信息比较敏感, 本次利用均方根振幅进行地震相预测。

关键词

页岩气, 地震相, 地震属性, 均方根振幅

Seismic Facies Analysis and Application of Shale Gas in Luzhou Area, Sichuan Basin

Kun Kang, Wenjia Li, Hongming Li, Meng Wang, Jinyu Zhou, Juan Lai, Weining Yang

Southwest Geophysical Research Institute, BGP Inc., CNPC, Chengdu Sichuan
Email: kangkun_sc@cnpc.com.cn

Received: Mar. 1st, 2021; accepted: Jun. 23rd, 2021; published: Jun. 30th, 2021

文章引用: 康昆, 李文佳, 李鸿明, 王梦, 周津宇, 赖娟, 杨卫宁. 四川盆地泸州地区页岩气地层地震相分析及实际应用[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(6): 913-920. DOI: 10.12677/AG.2021.116086

Abstract

Seismic facies is the appearance of reflected wave in seismic reflection time profile. Seismic facies analysis which was studied by analyzing the shape, amplitude, frequency, and continuity of seismic wave reflects special geological phenomena, sedimentary phenomena and fluid characteristics from many aspects. Seismic facies analysis has become an important means of fine reservoir description. For the shale formation in Luzhou area, Sichuan Province, although the current seismic resolution is still difficult to achieve the accurate identification of a single small layer, 3D seismic attribute analysis can objectively reflect the difference characteristics of the reservoir. Through drilling calibration and sedimentary facies analysis, this difference reflects the heterogeneity characteristics of the reservoir to a certain extent, and reflects the distribution of the reservoir thickness. Root mean square amplitude (RMS) represents the square root of the energy (amplitude square) in the time domain in the time window. It can be used to show isolated or extreme amplitude anomalies, and its lateral variation can be used to study the formation lithology change, physical property and gas bearing property. The root mean square amplitude attribute is sensitive to the formation amplitude information. This time, the root mean square amplitude is used for seismic facies prediction.

Keywords

Shale Gas, Seismic Facies, Seismic Attributes, RMS Amplitude

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来,我国页岩气勘探开发已进入增储上产的关键时期。四川盆地页岩气主力战场,该区优质海相页岩普遍发育于上奥五峰组-龙马溪组龙一段下部地层,是目前四川盆地页岩气开发的主要层系。近年来,我国页岩气勘探开发已进入增储上产的关键时期。志留系龙马溪组龙一¹⁺²小层是目前川南地区页岩气水平井的主要目的层,厚度仅为3~5米。由于地震纵向分辨率受限,在常规三维地震剖面中是无法识别出来的。在页岩气开发中,水平井钻遇率是决定开发效果的关键影响因素。随着页岩气地震勘探开发的深入,如何识别龙一₁亚段各小层已成为迫切需求[1][2][3][4]。本文探讨利用储层预测结果,进行龙一₁亚段各小层识别,在此基础上进行属性提取。

属性提取的时窗非常关键,图1是连井测井曲线图,图上可见研究区内主要目的层龙一₁段优质页岩厚度变化较大,没办法开一个固定时窗,这就要求我们要想办法追踪出龙一₁段小层顶底界面。

2. 优质页岩测井响应特征

图2为研究区内L4井测井曲线,图中红色为龙一₁³小层~五峰组优质页岩,橙色为龙一₁⁴小层优质页岩,绿色为非优质页岩,优质页岩测井划分门槛值为 $\text{toc} \geq 2\%$,可以看出:优质页岩位于龙马溪组底部,龙马溪组优质页岩具有高自然伽马、低纵波速度、低密度、低纵横波速度比的特征。龙一₁³小层~五峰组优质页岩较龙一₁⁴小层优质页岩具有相对低密度的特征[5]。

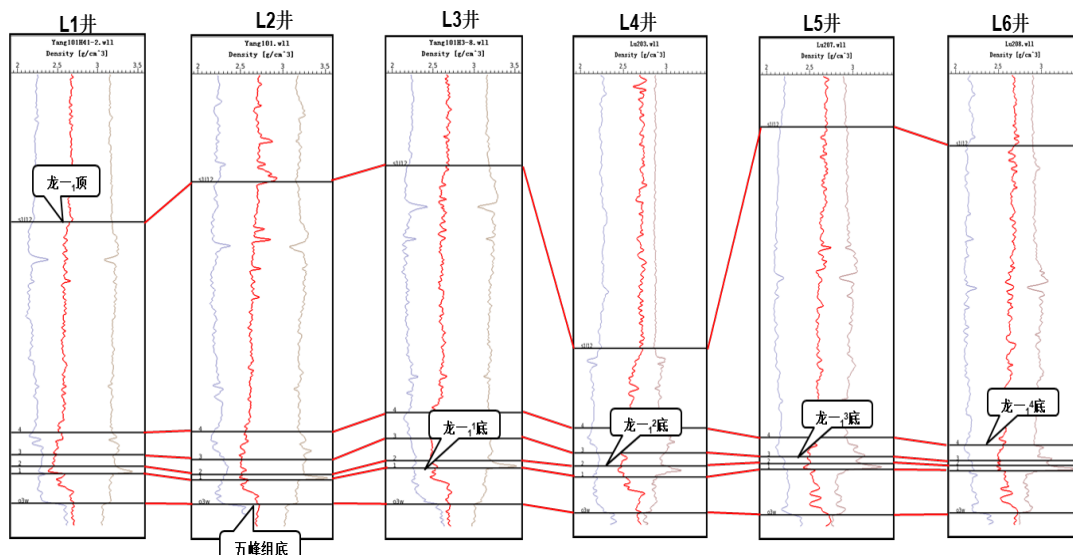


Figure 1. Logging curve of connected wells in the study area
图 1. 研究区内连井测井曲线图

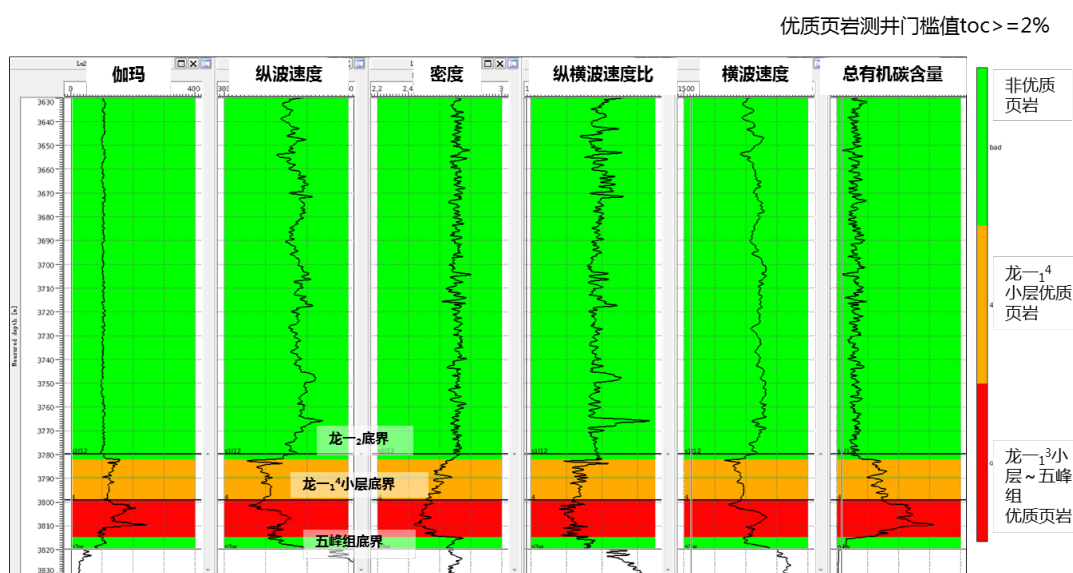


Figure 2. Logging curve of well L4
图 2. L4 井测井曲线图

地震反演是页岩气层特征定量描述的重要手段之一，它将地震资料、测井数据、地质解释相结合，具有较高的垂向分辨率和横向分辨率的特点，可将地震信息转换成页岩气层信息。综合考虑地震资料基础和反演方法试验对比，本次采用叠前同时反演技术对页岩气层进行储层预测。

叠前同时反演技术是利用叠前 CRP 道集数据和井数据(横波速度、纵波速度、密度及其他弹性参数资料)、基于 Zoeppritz 方程或其近似式反演求解得到与岩性、含油气性相关的多种弹性参数的一种反演方法。

通过 AVO 正演分析分析了数据处理的保真报幅，在此基础上，开展基于模型约束的叠前同时反演。主要分为 6 个步骤：数据导入、子波提取、层位标定、模型构建、反演参数优选(反演参数 QC)及反演结

果分析。进一步，反演纵波速度、横波速度、密度后，可以组合计算得到 V_p/V_s , $\lambda\rho$ 、 $\mu\rho$ 、 σ 和岩石脆性等储层参数。

叠前同时反演中用于控制反演效果的参数较多，这些参数对反演结果影响不同。经测试，反演的主要参数如下：

A set of Angle Dependent Wavelets (for Pre-Stack Inversion): 6-1(6.5); 6-2(11.5); 6-3(16.5); 6-4(21.5); 6-5(26.5); 6-6(31.5)

Prewhitening method: %Pre-whitening

P_impedance: 0.3; S_impedance: 0.3; Density: 0.2

Scaler adjustment factor: 1

反演的时窗为：奥陶系五峰组底界向上 200 ms~奥陶系五峰组底界向下 50 ms。

通过叠前同时反演得到纵波速度体、横波速度体、密度体。密度反演剖面上井旁道反演结果与测井曲线吻合度较高，特征一致，龙马溪组页岩储层较非储层具有相对低密度的特征明显。图 3 为研究区内密度曲线连井图，图中红色为龙一³小层~五峰组优质页岩，橙色为龙一⁴小层优质页岩，绿色为非优质页岩，优质页岩测井划分门槛值为 $toc \geq 2\%$ ，可以看出：龙马溪组优质页岩较非优质页岩具有相对低密度的特征，龙一³小层~五峰组优质页岩较龙一⁴小层优质页岩具有相对低密度的特征。

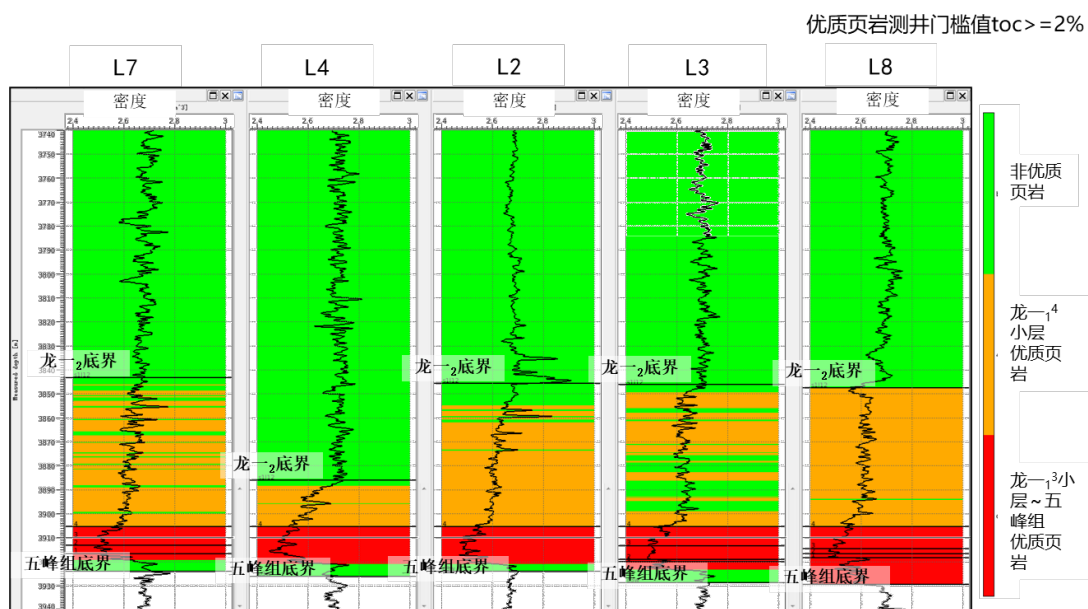


Figure 3. Density curve
图 3. 密度曲线图

分析该区优质页岩地球物理岩石敏感参数，见图 4，图中红色为龙一³小层~五峰组优质页岩，橙色为龙一⁴小层优质页岩，绿色为非优质页岩，优质页岩测井划分门槛值为 $toc \geq 2\%$ ，可以看出，龙马溪组优质页岩与非优质页岩在纵波速度和横波速度上有较大的重叠区域，利用纵波速度或横波速度识别优质页岩的难度较大。但密度、纵横波速度比可较好地区分龙马溪组优质页岩与非优质页岩。龙马溪组龙一⁴小层优质页岩与龙一³小层~五峰组优质页岩在纵波速度、横波速度、纵横波速度比上有较大的重叠区域，利用纵波速度、横波速度或纵横波速度比识别优质页岩的难度较大。但密度可较好地区分龙马溪组龙一⁴小层优质页岩与龙一³小层~五峰组优质页岩。

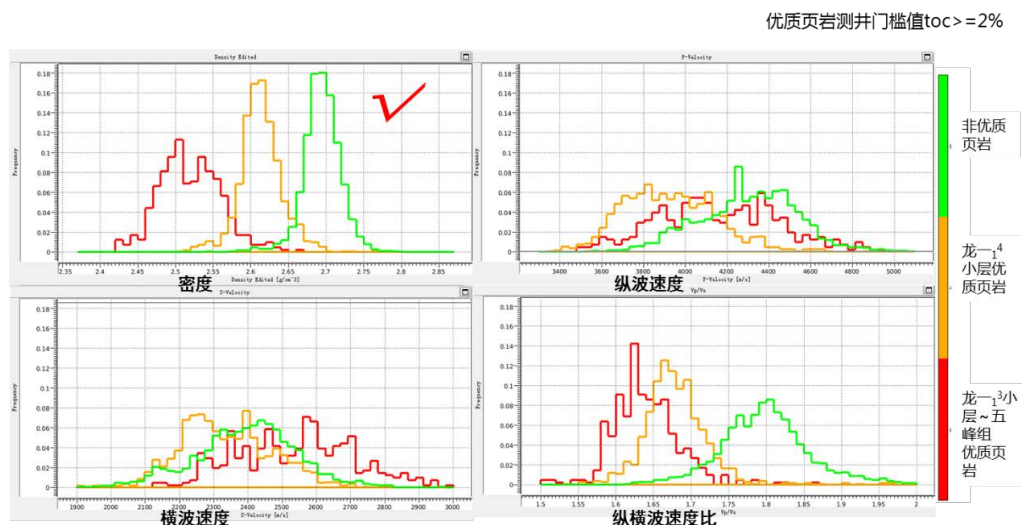


Figure 4. Histogram of sensitive parameters
图 4. 敏感参数直方图

综上测井曲线、优质页岩敏感参数分析，选用密度可同时区分优质页岩与非优质页岩，龙一₄小层优质页岩与龙一₃小层~五峰组优质页岩。

3. 叠前反演

通过前面分析，可知在工区优质页岩具有相对低密度的特征，因此我们利用叠前密度反演来对优质页岩进行预测。

叠前同时反演技术是利用叠前 CRP 道集数据(或部分叠加数据)、速度数据(一般为偏移速度)和井数据(横波速度、纵波速度、密度及其他弹性参数资料)，通过使用不同的近似式反演求解得到与岩性、含油气性相关的多种弹性参数的一种反演方法，用来预测储层岩性、储层物性及含油气性等。

此次叠前同时反演是在叠前 CRP 道集数据上进行反演，主要经过数据导入、层位标定、子波提取、模型构建、反演参数选取(反演参数 QC)及反演共 6 个步骤完成，反演得到纵波速度、横波速度、密度，通过参数计算可以得到 V_p/V_s 、 $\lambda\rho$ 、 $\mu\rho$ 和岩石脆性等，流程如图 5 所示[6] [7] [8] [9] [10]。

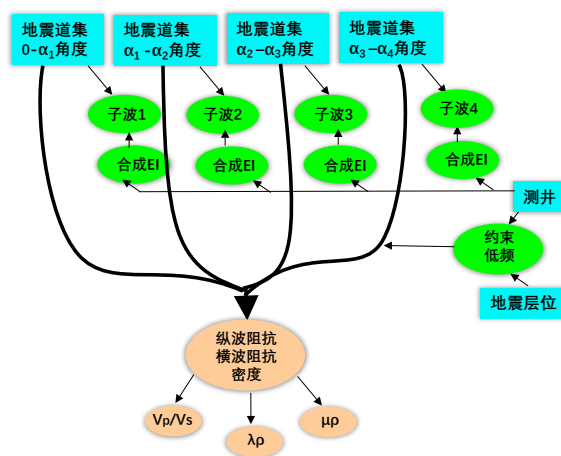


Figure 5. Flow chart of prestack simultaneous inversion
图 5. 叠前同时反演流程图

叠前同时反演得到纵波速度体、横波速度体、密度体。图 6 为研究区内连井的纵波速度和横波速度反演剖面。从图上可以看出：反演剖面上井旁道反演结果与测井曲线吻合度较高，特征一致。

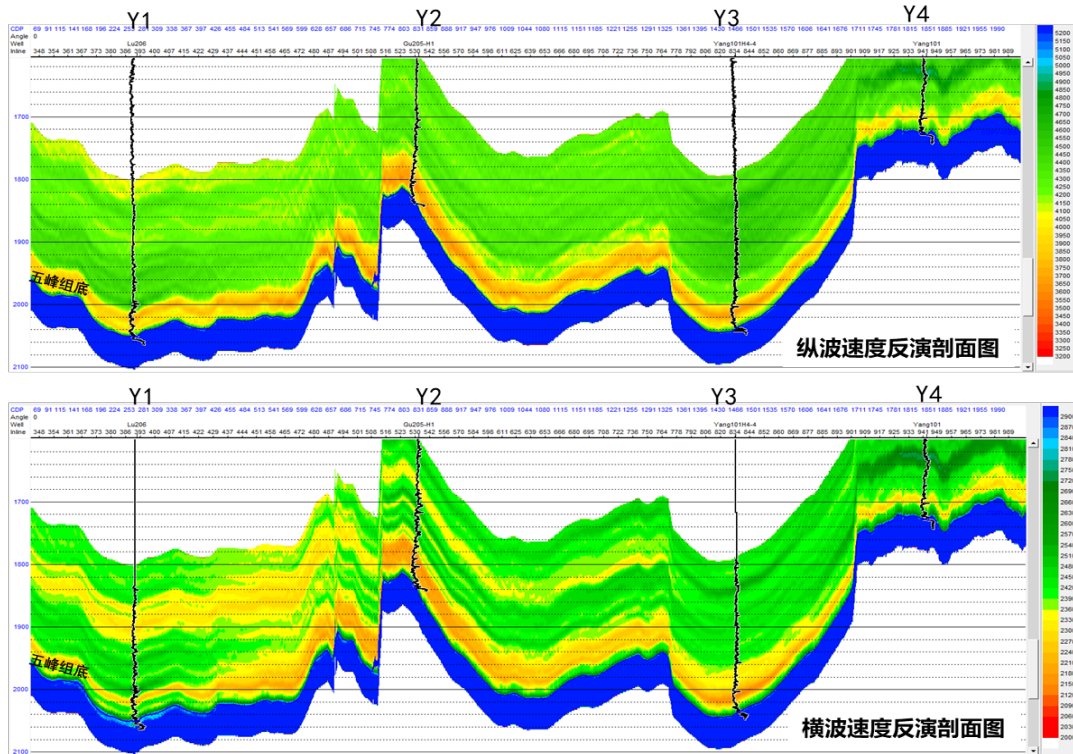


Figure 6. Inversion profile of P-wave and S-wave velocity in the study area
图 6. 研究区内连井纵横波速度反演剖面

图 7 为连井密度反演剖面。从图上可以看出：密度反演剖面上井旁道反演结果与密度曲线吻合度高，特征一致；龙马溪组底部呈现为低密度特征，且分布较连续，与龙马溪组优质页岩地质特征相吻合。龙马溪组优质页岩较非优质页岩具有相对低密度的特征，龙一₃小层~五峰组优质页岩较龙一₄小层优质页岩具有相对低密度的特征[11] [12] [13]。

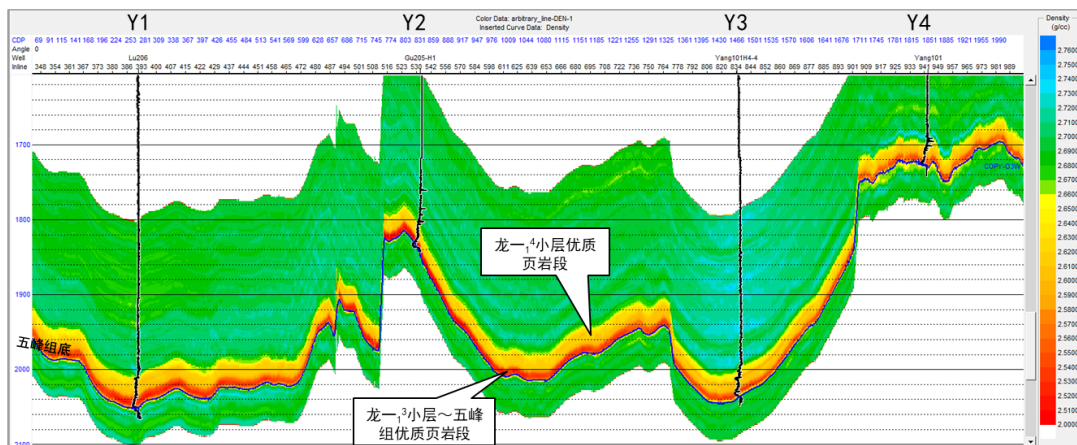


Figure 7. Density inversion profile of multiple wells in the study area
图 7. 研究区内连井密度反演剖面

4. 小层层位对比追踪

由于龙马溪组优质页岩较非优质页岩具有相对低密度的特征，龙一₁³小层~五峰组优质页岩较龙一₁⁴小层优质页岩具有相对低密度的特征。密度反演剖面上可以较准确地追踪出龙一₁⁴和龙一₁³小层顶界见图 8。

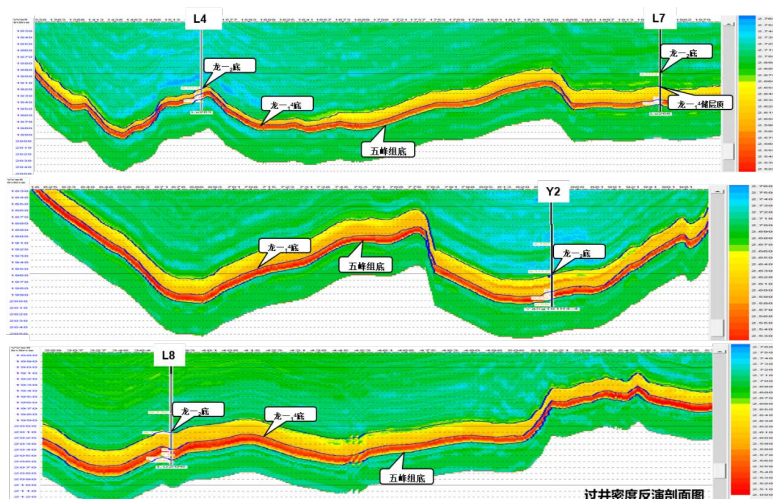


Figure 8. Inversion profile of through well density
图 8. 过井密度反演剖面

5. 地震相及效果分析

图 9 为龙一₁亚段的均方根振幅图(时窗为龙一₁亚段顶-五峰组底), 图上可以看出, 区内存在两个红色条带异常体, 通过与实钻对比分析, 认为该红色异常条带区内龙一₁⁴小层厚度减薄, 若目标井位于该红色一条带内, 在钻井时应注意, 及时调整轨迹以免钻穿目的层。L4 井周围实施水平井, 龙一₁⁴小层沉积厚度不稳定, 导向首个标志层出现之后, 对地震 A 点预测精度要求更高, 目前地震预测 A 点深度及产状精度尚不能满足精确入靶, 靶前距超出设计较多, 所以摸索龙一₁⁴小层减薄规律, 根据实钻成果, 及时开展地震跟踪处理, 不断优化校正 A 点深度及产状尤为重要。图 10 为龙一₁亚段地震相图四小层减薄区实际钻井展示图, 实钻与预测符合率较高, 可见本次地震相分析对实际钻井有较好的指导作用[14][15]。

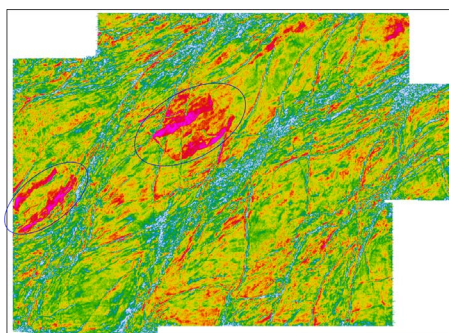


Figure 9. Prediction map of seismic facies (root mean square amplitude) of longyi-1 sub member
图 9. 龙一₁亚段地震相(均方根振幅)预测图

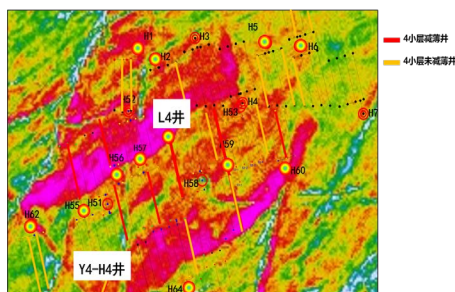


Figure 10. Prediction of seismic facies (root mean square amplitude) of longyi-1 sub member in the thinning area of the fourth sublayer

图 10. 四小层减薄区龙一₁亚段地震相(均方根振幅)预测图

6. 结论与认识

基于小层追踪的地震相(均方根振幅)预测, 比开固定时窗做的地震相(均方根振幅)预测更加准确可靠, 实际钻井结果也进一步证实了该成果的可靠性。目前该成果已经应用到实际生产中, 在实际钻井中对水平井入靶点深度的预测及井轨迹的优化设计起到了重要的指导作用,

参考文献

- [1] 张金川, 徐波, 聂海宽, 汪宗余, 林拓, 等. 中国页岩气资源勘探潜力[J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 136-140.
- [2] 刘振武, 撒利明, 杨晓, 等. 页岩气勘探开发对地球物理的需求[J]. 石油地球物理勘探, 2011, 46(5): 810-818.
- [3] 李志荣, 邓小江, 等. 四川盆地南部页岩气地震勘探新进展[J]. 天然气工业, 2011, 31(4): 40-43.
- [4] 王世谦, 陈更生, 董大忠. 四川盆地下古生界页岩气藏形成条件与勘探前景[J]. 天然气工业, 2009, 29(5): 51-58.
- [5] 潘仁芳, 伍媛, 等. 页岩气勘探的地球化学指标及测井分析方法初探[J]. 中国石油勘探, 2009(3): 6-9.
- [6] Vernik, L. and Milovac, J. (2011) Rock Physics of Organic Shale. *The Leading Edge*, **30**, 318-323. <https://doi.org/10.1190/1.3567263>
- [7] 苑书金, 董宁, 于常青. 叠前联合反演 P 波阻抗和 S 波阻抗的研究和应用[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(3): 339-342.
- [8] 印兴耀, 袁世洪, 张繁昌. 从弹性波阻抗反演中提取岩石物理参数[C]. CPS/SEG2004, 国际地球物理会议论文集. 北京.
- [9] 蒲泊伶, 等. 四川页岩气成藏条件分析[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 中国石油大学, 2008.
- [10] 赵培荣, 等. 页岩气勘水平井穿行层位优选[J]. 石油实验地质, 2020, 42(6): 142-151.
- [11] Aki, K. and Richards, P.G. (1980) *Quantitative Seismology*. W. H. Freeman and Co.
- [12] An, P., Moon, W.M. and Kalantzis, F. (2001) Reservoir Characterization Using Seismic Waveform and Feedforward Neural Networks. *Geophysics*, **66**, 1450-1456. <https://doi.org/10.1190/1.1487090>
- [13] Pollastro, R.M. (2007) Total Petroleum System Assessment of Undiscovered Resources in the Giant Barnett Shale Continuous (Unconventional) Gas Accumulation, Fort Worth Basin, Texas. *AAPG Bulletin*, **91**, 551-578. <https://doi.org/10.1306/06200606007>
- [14] Harris, N.B. (2011) Mechanical Anisotropy in the Woodford Shale, Permian Basin: Origin, Magnitude, and Scale. *The Leading Edge*, **30**, 284-291. <https://doi.org/10.1190/1.3567259>
- [15] Prasad, M., Pal-Bathija, A. and Johnston, M. (2009) Rock Physics of the Unconventional. *The Leading Edge*, **28**, 34-38. <https://doi.org/10.1190/1.3064144>