

基于全道集叠前反演的页岩气水平井目标靶体储层厚度预测

黄丽鹃, 杨 晓, 张入月, 王小兰, 李睿宁, 周诗雨, 张怀明

中石油集团东方地球物理勘探有限责任公司西南物探研究院, 河北 涿州
Email: 723862672@qq.com

收稿日期: 2021年6月24日; 录用日期: 2021年7月19日; 发布日期: 2021年7月26日

摘 要

四川盆地下志留统龙马溪组海相页岩气工作已经进入大规模效益开发阶段, 水平井目标靶体段仅为龙马溪底部连续I类优质页岩段。开展连续I类优质页岩段精细预测, 引导水平井实钻轨迹准确入靶, 确保水平井水平段在箱体中钻进, 提高水平井的钻遇率, 是页岩气勘探 - 开发一体化的迫切需要。本论文以四川盆地Z地区为例, 将基于全道集叠前同时反演应用于生产实践, 预测页岩气水平井目标靶体储层厚度, 指导水平井轨迹设计。结果表明: 基于全CRP道集叠前同时反演技术充分利用了原始道集中完整的AVO信息, 解决了目前页岩气薄层甜点识别的难题, 提高了页岩气水平井钻探成功率, 降低了勘探开发成本。

关键词

四川盆地, 页岩气I类优质页岩, 水平井目标靶体, 全道集叠前同时反演

Pre-Stack Inversion of Target Reservoir Thickness Prediction for Shale Gas Horizontal Wells Based on Full Gathers

Lijuan Huang, Xiao Yang, Ruyue Zhang, Xiaolan Wang, Ruining Li, Shiyu Zhou, Huaiming Zhang

BGP Southwest Geophysical Institute of CNPC, Zhuozhou Hebei
Email: 723862672@qq.com

Received: Jun. 24th, 2021; accepted: Jul. 19th, 2021; published: Jul. 26th, 2021

文章引用: 黄丽鹃, 杨晓, 张入月, 王小兰, 李睿宁, 周诗雨, 张怀明. 基于全道集叠前反演的页岩气水平井目标靶体储层厚度预测[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(7): 995-1004. DOI: 10.12677/ag.2021.117095

Abstract

The marine shale gas in the Lower Silurian Longmaxi Formation in the Sichuan Basin has entered a stage of large-scale profitable development. However, at present, the target section of horizontal shale gas wells is only the continuous type I high-quality shale section at the bottom of Longmaxi. The precise prediction of continuous type I high-quality shale sections is carried out to guide the actual drilling trajectory of horizontal wells to accurately enter the target, so as to ensure that the horizontal section of the horizontal well is drilled in the box, so that the drilling encounter rate of the horizontal well can be improved. This is the urgent need for the integration of rock and gas exploration and development. This thesis takes the Z area of the Sichuan Basin as an example, and applies the pre-stack inversion based on the complete collection data to production practice to finely predict the target reservoir thickness of a shale gas horizontal well, thereby guiding the horizontal well trajectory design. Our research results show that the pre-stack inversion technology based on full CRP gathers makes full use of the complete AVO information of the original gathers, solves the current problem of identifying sweet spots in shale gas thin layers, and improves the success of shale gas horizontal well drilling, and reduce the cost of shale gas exploration and development.

Keywords

Sichuan Basin, Type I High-Quality Shale, Horizontal Well Target Body, Pre-Stack Inversion of the Complete Set of Channels

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

中国页岩气从最初的评层选区到如今的大规模效益开发,已经逐步走上工业化和商业化之路;四川盆地志留统龙马溪组海相页岩是目前中国页岩气发展的主要产层[1],勘探开发面临着山地地表复杂、地下构造复杂、页岩构造复杂、页岩埋深大、储层薄、横向非均质性等难题。我国的页岩气资源丰富,主要分布在四川盆地及其周缘地区上奥陶统五峰组-下志留统龙马溪组地层中[2]。四川盆地志留统龙马溪组海相页岩是目前中国页岩气发展的主要产层[3],水平井的箱体设计都是在厚度仅 3~10 米的连续 I 类优质页岩段(即水平井目标靶体)。如何提高水平井的储层钻遇率,成为目前页岩气大规模勘探开发过程中亟待解决的关键性问题[4]。

要解决储层钻遇率低的问题,首先要能够通过地震方法精准的识别出我们页岩气水平井的靶体储层。本文采用一种基于全叠加道集叠前同时反演的方法来解决目前页岩气水平井靶体厚度预测的问题[5],指导水平井精准入靶。

2. 全道集叠前反演

目前页岩气储层预测中,使用比较多的方法是常规叠前反演(是基于部分叠加数据体进行的)[6]。基于部分叠加数据体的叠前反演,主要技术思路是对 CRP 道集进行部分叠加输入三个不同角度叠加的地震数据和对应的子波,给出不同数据(纵、横波阻抗、密度)的纵向变化趋势及横向上的约束范围,通过叠前

同时反演,得到纵、横波阻抗和纵横波速度体等数据[7]。基于角度叠加数据叠前反演的局限性在叠前求解密度等参数时尤其突出,这种方法所使用的基础数据体以地震道振幅的平均值作为该部分叠加剖面的振幅值,在反演过程中仅考虑几个部分叠加剖面的平均振幅信息,损失了地震叠前道集中的 AVO 信息,会降低叠前弹性参数的反演精度[8]。

基于全 CRP 道集的叠前同时反演是目前页岩气水平井目标靶体厚度预测的关键技术。全叠加 CRP 道集包含了较完整的 AVO 信息,基于全叠加道集的叠前同时反演能充分利用叠前道集中的 AVO 信息,增强页岩气水平井目标靶体预测的可靠性[9]。

为提高叠前同时反演的抗噪能力,确保反演精度,须对原始道集进行优化处理。基于全道集的叠前反演主要经过数据导入、道集修饰处理、层位标定、子波提取、模型构建、反演参数选取(反演参数 QC)、反演、质控共 8 个步骤完成[10]。全道集叠前同时反演前要对道集进行修饰处理:1) 对原始 CRP 道集进行修饰处理以获得高品质的叠前道集,修饰处理包括道切除、滤波、超级道集处理、非地表一致性静校正等;2) 利用层速度把 CRP 道集转化为角度域道集后方可进行叠前同时反演。我们首先采用切除来消除远偏移距道集上的噪声(图 1);利用带通滤波来消除剩余的低频噪声(图 2);生成超级道集能够有效的压制随机噪声(图 3);进行非地表一致性静校正是为了校正目的层段剩余时间问题(图 4)。

通过对全道集的一系列优化处理,经优化处理后的道集质量得到明显改善,获得了高品质的叠前道集,可直接进行叠前同时反演[11]。弹性参数的反演精度直接决定了预测结果的可靠性。因此在进行叠前同时反演过程中要反复进行参数的测试,得到比较满意的反演结果后,采取严格的质量控制措施来验证反演结果的可靠性。在反演的测试阶段,首先会对整个数据体的目标小区块进行多次反复的参数实验[12],每次实验均会得到一个反演结果。基于所得到的反演结果,要知道是否可靠,就要对反演结果进行一次正演,生产一个合成道集,将合成道集与原始道集相减得到误差道集,当误差道集趋于白噪音时,才可以实施整个全道集数据体的叠前同时反演。

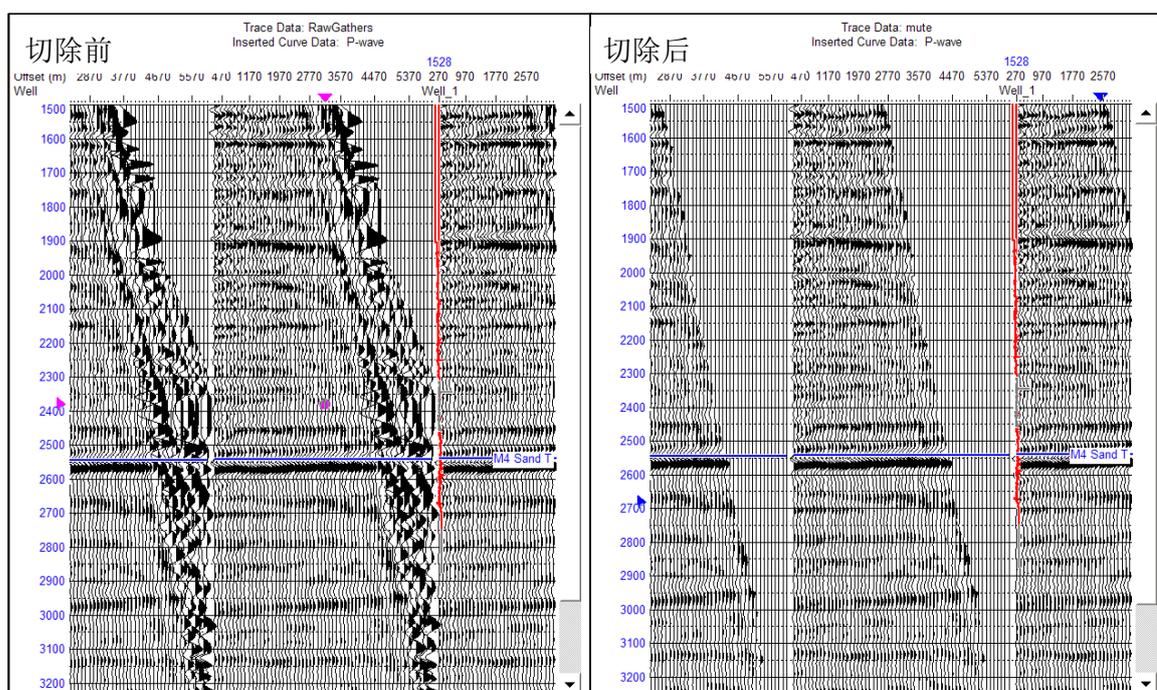


Figure 1. Comparison of before and after resection

图 1. 切除前后对比图

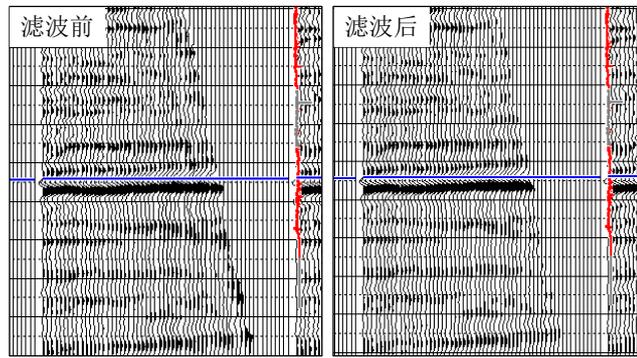


Figure 2. Comparison chart before and after filtering

图 2. 滤波前后对比图

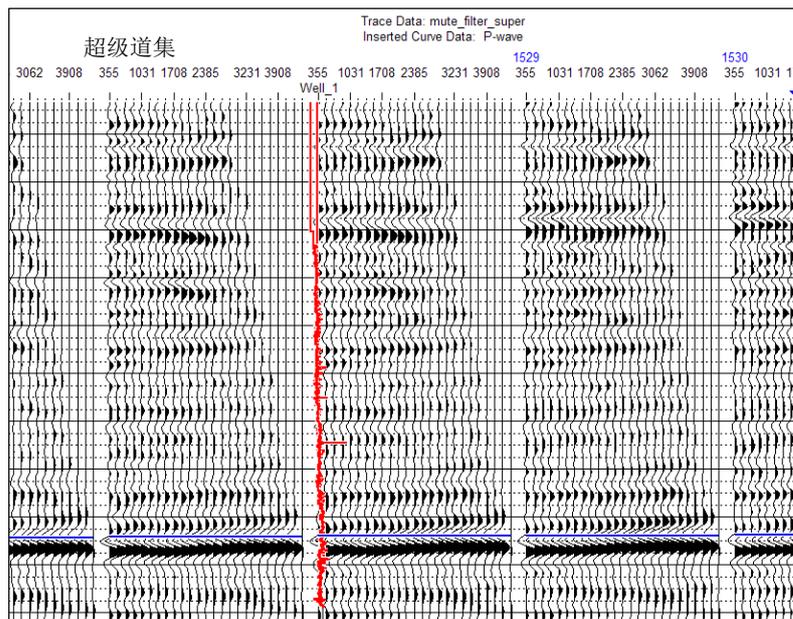


Figure 3. Generate super gather

图 3. 生成超级道集

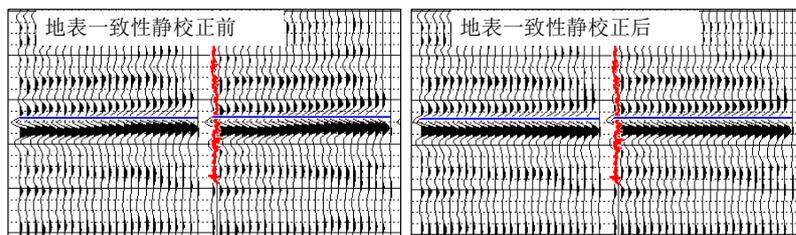


Figure 4. Comparison of non-surface consistent static correction before and after

图 4. 非地表一致性静校正前后对比图

3. 页岩气水平井目标靶体储层特征分析

3.1. 研究区地层划分

四川盆地 Z 地区龙马溪组处于深水外陆棚环境，沉积了大量富有有机质的黑色页岩(图 5)。龙马溪组

岩性主要为灰黑色粉砂质页岩、炭质页岩、硅质页岩夹泥质粉砂岩，龙马溪组地层自上而下颜色逐渐加深、砂质逐渐减少、有机质含量明显增高[13]。龙马溪组优质页岩厚度在20~65 m，脆性矿物含量30%~75%，为页岩气勘探提供了有利条件。根据岩性组合、电性特征、沉积旋回、古生物、地球化学特征，龙马溪组自下而上分为龙一段、龙二段；龙一段自下而上分为龙一₁亚段、龙一₂亚段。龙一₁亚段是Z区块页岩气勘探开发主要目的层。岩性以黑色碳质页岩、黑色页岩、硅质页岩、黑色泥岩、黑色粉砂质泥岩和灰黑色粉砂质泥岩为主。龙一₁亚段自下而上又分为1、2、3、4共4个小层，1和2小层是目前页岩气水平井的靶体层，属于I类优质页岩，主要是黑色碳质、硅质页岩，GR在底部出现龙马溪组内最高值，在170~500 API，TOC在3%~12% (图6)。

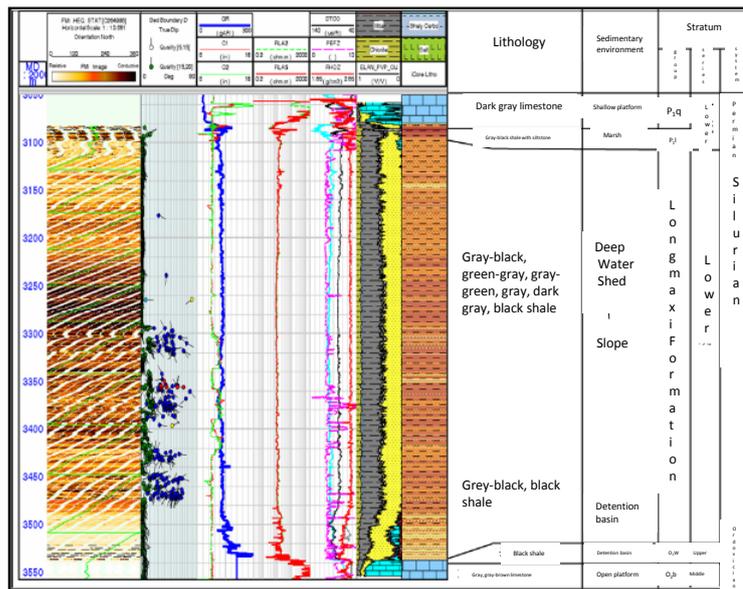


Figure 5. W well lithology histogram
图5. W井岩性柱状图

地层				特征	厚度 (m)
系	组	亚段	小层		
二叠系	梁山组	/	/	碳质泥页岩与龙马溪组顶界灰绿色粉砂质泥岩分界，高GR、AC、CNL，低RT、DEN	2~10
志留系	龙马溪组	龙二段	龙二段底部灰黑色页岩与下覆龙一段黑色页岩-灰色粉砂质页岩相间的韵律层分界	100~250	
			龙一 ₂ 亚段	岩性以龙一 ₂ 底部深灰色页岩与下伏五峰组-龙一 ₁ 灰黑色页岩分界，GR、AC整体低于五峰组-龙一 ₁ ，DEN整体高于五峰组-龙一 ₁ ，TOC进入五峰组-龙一整体高于2%	100~150
		龙一段	4小层	厚度大，GR为相对3小层低平的箱型，140~180 (API)，AC、CNL低于3，DEN高于3，TOC低于3	6~25
			3小层	标志层，黑色碳质、硅质页岩，GR陀螺型凸出于4、2小层，160~270 (API)，高AC，低DEN，TOC与GR形态相似	3~9
			2小层	厚度较大，黑色碳质页岩，GR相对3、1小层低平(类)箱型特征，与4类似，GR140~180 (API)，TOC分布稳定，低于1、3小层	4~11
			1小层	标志层，黑色碳质、硅质页岩，GR在底部出现龙马溪组内最高值，在170~500 (API)，TOC在4%~12%，GR最高值下半幅点为1小层底界	1~4
奥陶系	五峰组	/	顶界为观音桥段介壳灰岩，厚度不足1米，以下五峰组碳质硅质页岩；界限为GR指状尖峰下半幅点，高GR划入龙马溪组	0.5~15	

Figure 6. Stratigraphic division of the Longmaxi Formation
图6. 龙马溪组地层划分

3.2. 水平井靶体储层测井响应特征分析

选取长宁、威远及周缘地区测井储层来探讨 4 个小层及五峰组储层在纵横向分布特征。龙一₁4 小层储层组合为 III 类夹 II 类薄层，靠近龙一₁1 小层底部以 II 类储层为主，III 类储层纵向连续厚度较大，横向连续性较好，威远地区局部夹 I 类薄；龙一₁3 小层储层组合为 II 类夹薄 I 类储层，II 类纵向厚度大 II 类在横向上连续性较好；龙一₁2 小层储层组合为 I 类夹 II 类薄层，I 类储层纵向连续厚度较大，横向连续性较好；龙一₁1 小层储层组合为 I 类夹 II 类薄层，I 类储层纵向连续厚度较大，横向连续性较好。五峰组储层品质具有区域性差异，长宁地区以 I 类储层为主，纵向连续厚度较大，横向连续性较好，靠近底部灰岩(临湘组)其储层以 II 类储层为主；靠近古隆起的威远地区以 III 类为主，纵横向连续性大，夹薄 II 类；威远以东地区储层品质变好，荷包场地区以 II 类夹薄 III 类为主，大足地区以 I 类与 II 类互层分布。

四川盆地 Z 地区优质页岩段在纵向上主要分布在龙一₁亚段，储层与围岩在纵波速度、密度、纵横波速度比等方面都有明显差异，储层段较围岩具有明显的低纵波速度、低纵横波速度比、低密度、高自然伽马、高 TOC、高总含气量与高孔隙度特征。结合测井资料，从图 7 可以看出，水平井靶体储层(连续 I 类储层)在密度、纵横波速度比、横波速度、纵波速度上有较大的重叠区域，识别出靶体储层的难度较大。图 8 可以看出，靶体储层与非靶体储层在脆性指数、孔隙度、总含气量上有较大的重叠区域，但是总有机碳能够很好的区分出优质页岩(toc (总有机碳)大于等于 3.5)。

经过对区域内井资料进行分析，总有机碳与密度的相关性相对较好(图 9)，相关系数达到 0.89，可以用密度进行 TOC (总有机碳)定量预测[14]。

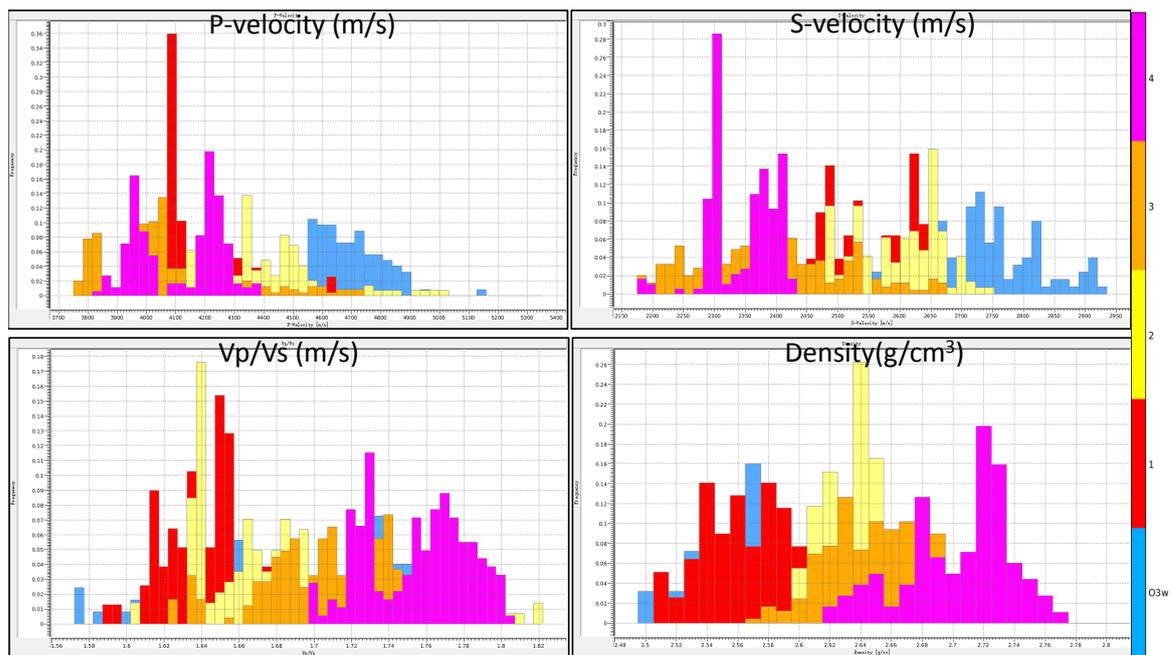


Figure 7. Analysis of sensitive parameters
图 7. 敏感参数分析

4. 基于全道集叠前反演的水平井目标靶体厚度预测效果分析

完成基于全道集叠前反演完成后，得到高精度的弹性参数数据体(纵波速度、横波速度、密度)。根据

TOC 与密度之间建立的关系式,将基于全道集叠前反演得到的密度数据体转换为 TOC 数据体。过 WELLA 总有机碳含量预测剖面(图 10)上井旁道反演结果与测井曲线吻合度较高,特征基本一致。龙马溪组龙一₁ 亚段 I 类连续储层的总有机碳含量较高(大于 3.5), 横向变化趋势合理。

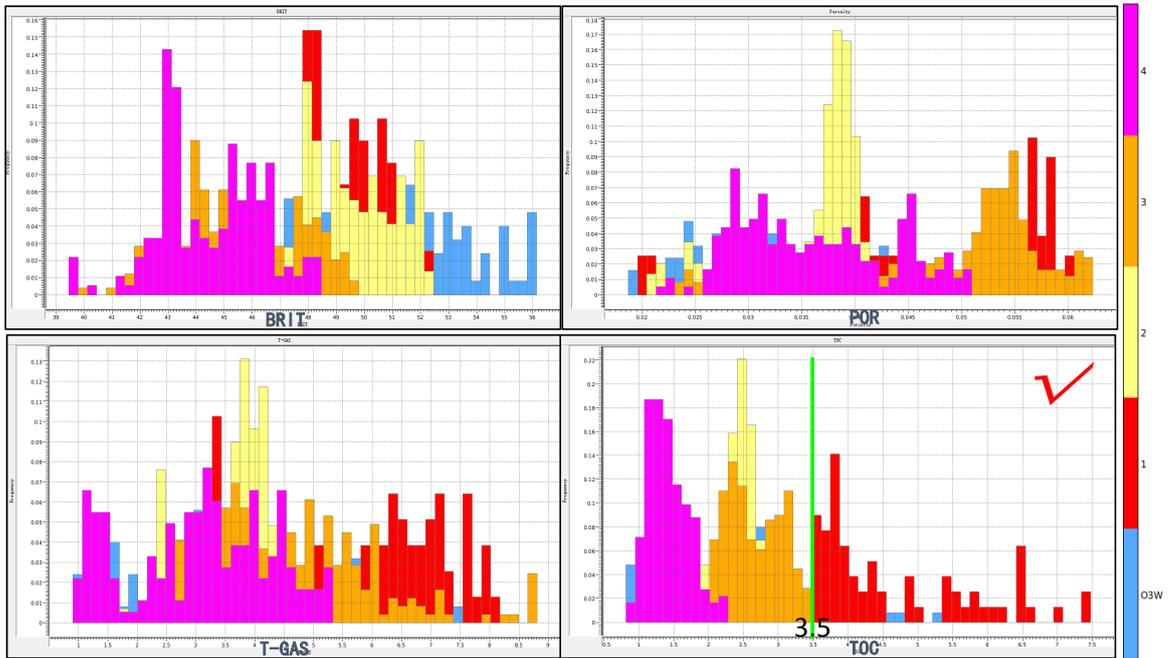


Figure 8. Analysis of sensitive parameters
图 8. 敏感参数分析

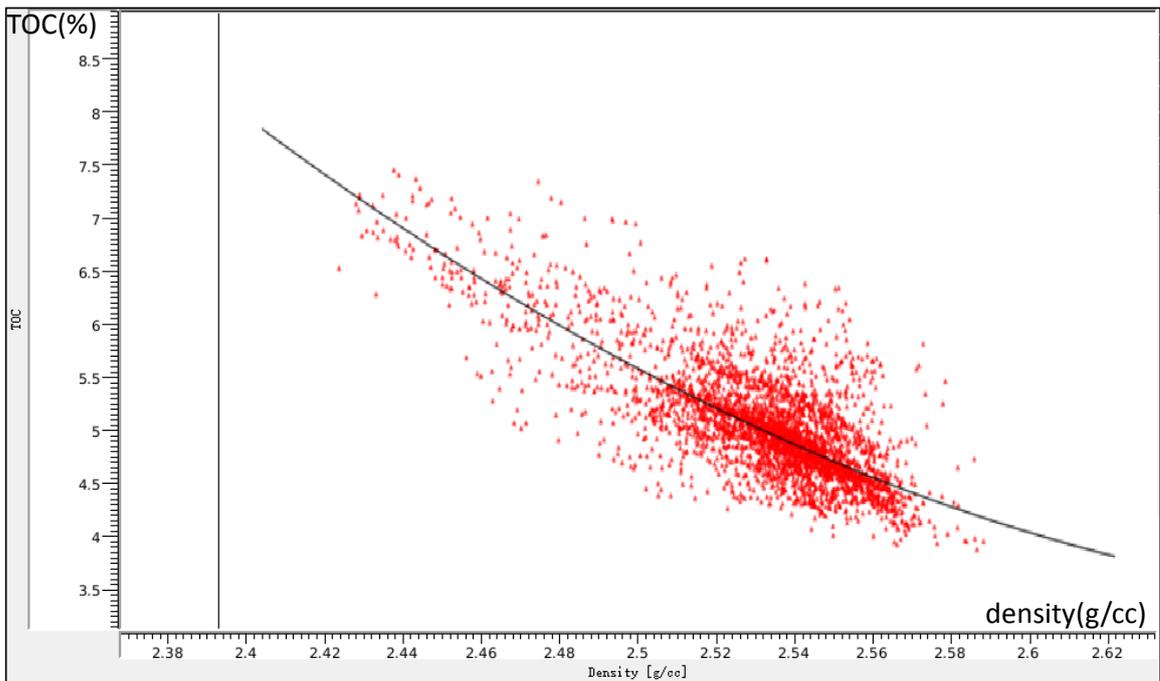


Figure 9. TOC and density intersection analysis of the target body segment
图 9. 靶体段 TOC 与密度交汇分析

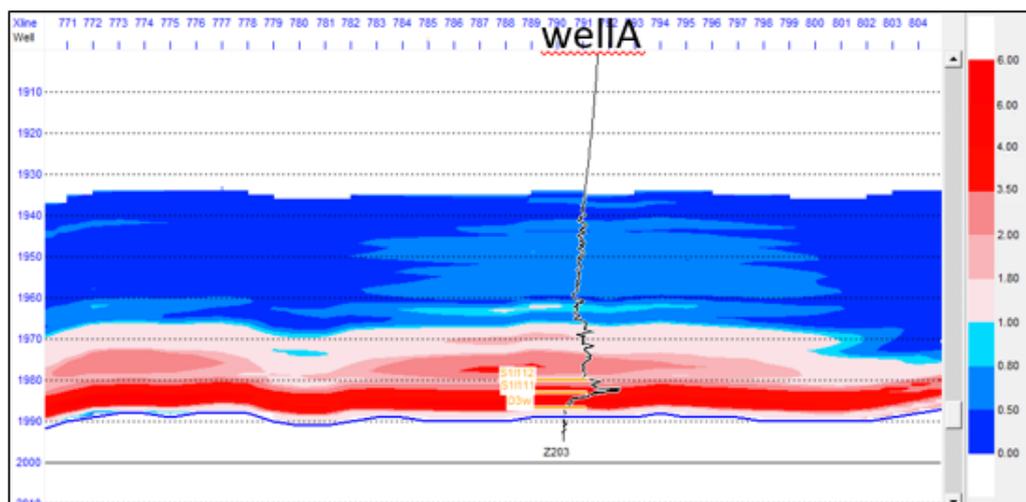


Figure 10. WELLA total organic carbon prediction profile
图 10. WELLA 总有机碳预测剖面

根据 toc (总有机碳含量) 预测数据体, 提取出总有机碳大于等于 3.5 的采样点(即为测井响应分析得到的水平井目标靶体, 连续 I 类储层段), 生成岩性体用于指导水平井工程设计, 保障水平井精准入靶(图 11)。计算该岩性体的时间累计厚度, 乘以对应点速度, 编制出龙马溪组靶体储层的厚度平面分布图(图 12)。

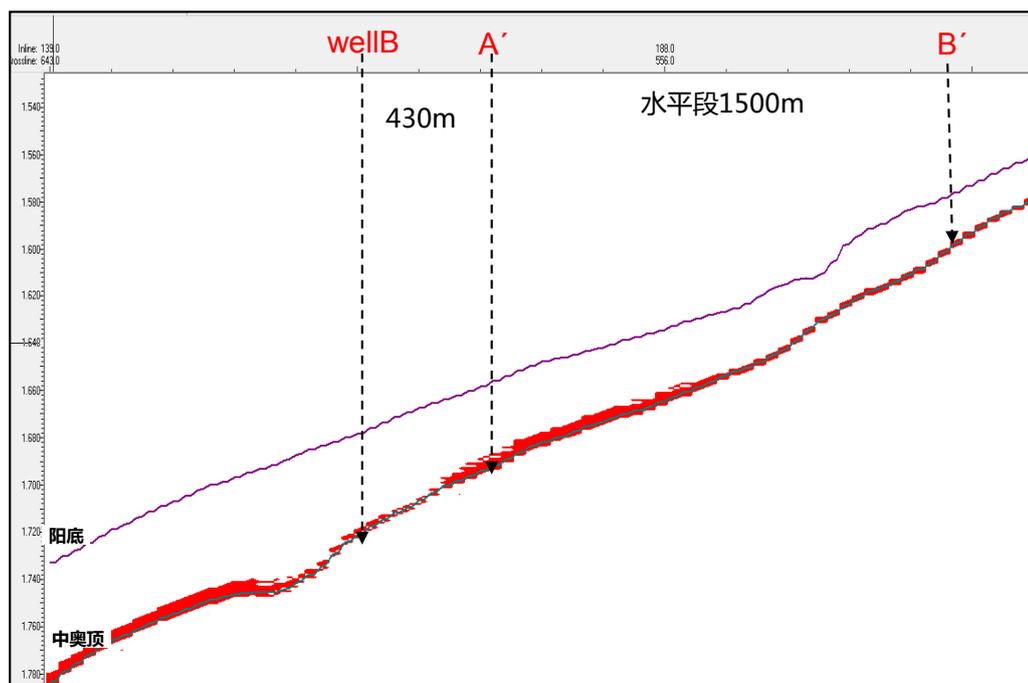


Figure 11. Lithology section of the target section of wellB well
图 11. 过 wellB 井目标靶体段岩性剖面

实钻结果表明, 利用我们的预测结果指导的水平钻井, 靶体层钻遇率高。预测的结果为水平井的精准入靶提供了重要依据和保障[15]。

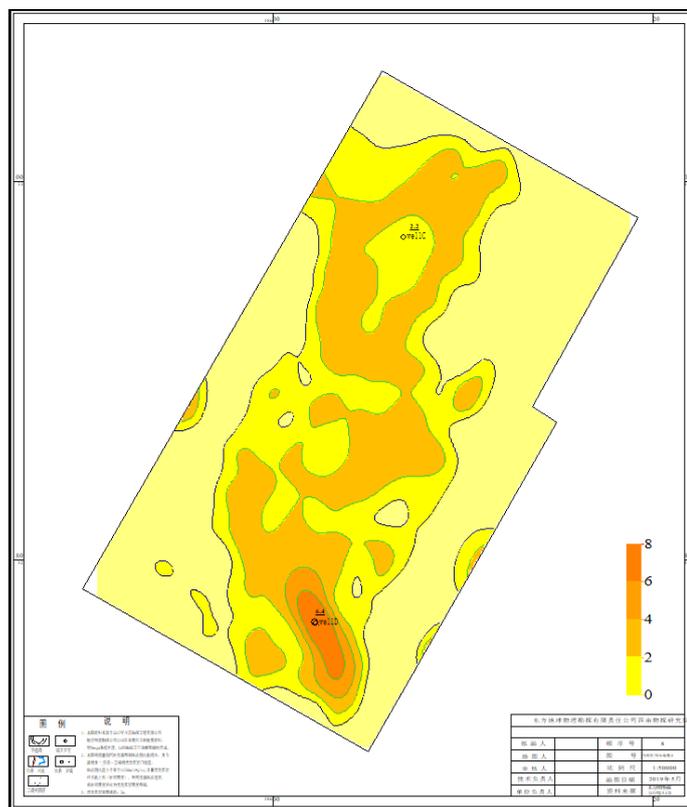


Figure 12. Thickness distribution map of the first class of high-quality shale in the Longmaxi Formation

图 12. 龙马溪组一类优质页岩厚度分布图

5. 结论

1) 基于全道集的叠前同时反演技术充分利用叠前道集中的 AVO 信息, 能刻画出水平井目标靶体的储层内部特征变化, 提高弹性参数的反演精度。

2) 水平井实钻结果表明, 结合全道集叠前密度反演获得 TOC 数据体, 预测出五峰组水平井目标靶体储层的空间及平面展布, 预测精度高, 为该区页岩气开发设计提供可靠依据。

参考文献

- [1] 李金磊, 尹正武. 四川盆地焦石坝地区页岩气储层地震定量预测方法[J]. 石油物探, 2015, 54(3): 324-330.
- [2] 曾庆才, 陈胜, 贺佩, 等. 四川盆地威远龙马溪组页岩气甜点区地震定量预测[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(3): 1-9.
- [3] 贾承造, 郑民, 张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(2): 129-136.
- [4] 司庆红, 司马献章, 张超, 等. 义马地区上古生界页岩气储层特征及有利目标层优选[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2018, 33(3): 16-22+36.
- [5] 张津海, 张远银, 孙赞东. 道集品质对叠前 AVO/AVA 同时反演的影响[J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(1): 68-73.
- [6] 聂海宽, 何治亮, 刘光祥, 等. 四川盆地五峰组-龙马溪组页岩气优质储层成因机制[J]. 天然气工业, 2020, 40(6): 31-41.
- [7] 胡伟光, 倪楷, 范春华. 海相页岩气储层预测与勘探[M]. 北京: 中国石化出版社, 2017.
- [8] 彭勇民, 龙胜祥, 何希鹏, 等. 彭水地区常压页岩气储层特征及有利区评价[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(5):

12-19.

- [9] 陈胜, 赵文智, 欧阳永林, 等. 利用地球物理综合预测方法识别页岩气储层甜点——以四川盆地长宁区块下志留统龙马溪组为例[J]. 天然气工业, 2017, 37(5): 20-30.
- [10] 李武广, 杨胜来, 王珍珍, 董谦, 吴克柳, 王海洋. 基于模糊优化分析法的页岩气开发选区模型[J]. 煤炭学报, 2013, 38(2): 264-270.
- [11] Chen, S., Zhao, W.Z., Ouyang, Y.L., Zeng, Q.C., Yang, Q., Hou, H.X., *et al.* (2017) Prediction of Sweet Spots in Shale Reservoir Based on Geophysical Well Logging and 3D Seismic Data: A Case Study of Lower Silurian Longmaxi Formation in W4 Block, Sichuan Basin, China. *Energy Exploration & Exploitation*, **35**, 147-171.
<https://doi.org/10.1177/0144598716679961>
- [12] 李霞, 周灿灿, 李潮流, 程相志, 胡松. 页岩气岩石物理分析技术及研究进展[J]. 测井技术, 2013, 37(4): 352-359.
- [13] 郭彤楼, 张汉荣. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. 石油勘探与开发, 2014, 41(1): 28-36.
- [14] 苏建龙, 屈大鹏, 陈超, 等. 叠前地震反演方法对比分析: 焦石坝页岩气藏勘探实例[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(3): 581-588.
- [15] 石晓闪, 刘大安, 崔振东, 孙波, 唐铁吾. 页岩气开采压裂技术分析 with 思考[J]. 天然气勘探与开发, 2015, 38(3): 62-65.