

基于曲线重构的薄储层地震预测技术及应用

王 涵, 冯 丽, 冯加阳, 李若霖, 金翔雄

重庆科技学院石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2023年10月20日; 录用日期: 2023年11月18日; 发布日期: 2023年11月27日

摘 要

高13区块扶杨油层储层砂体薄、横向变化快, 地震特征对薄砂体反映不明显, 储层预测难度大。为了实现研究区目的层薄储层的定量精细预测, 采用波形指示模拟方法定量预测薄储层厚度, 通过岩石物理分析选取对薄层砂岩敏感的曲线, 采用曲线重构技术构建研究区能够识别薄储层的敏感曲线, 并通过QC质量监控及试验剖面反演效果对比选取最优反演参数。研究结果表明研究区电阻率曲线和波阻抗曲线识别储层较敏感, 重构后的反演结果可以更好的识别薄储层; 扶余油层砂岩累计厚度在5~40 m之间, 厚度高值区位于研究区南西部, 整体呈北西 - 南东向条带状展布。杨大城子油层YI油层砂岩累计厚度在15~60 m之间, 厚度高值区位于研究区南部, 整体呈北西 - 南东向条带状展布, 砂体展布方向与扶余油层相似。

关键词

薄储层, 地震反演, 波形指示模拟, 曲线重构, 储层预测

Seismic Prediction Technology and Application of Thin Reservoir Based on Curve Reconstruction

Han Wang, Li Feng, Jiayang Feng, Ruolin Li, Xiangxiong Jin

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Oct. 20th, 2023; accepted: Nov. 18th, 2023; published: Nov. 27th, 2023

Abstract

The reservoir sand body of Fuyang oil formation in Gao 13 block is thin with fast lateral variations.

文章引用: 王涵, 冯丽, 冯加阳, 李若霖, 金翔雄. 基于曲线重构的薄储层地震预测技术及应用[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(11): 1310-1320. DOI: 10.12677/ag.2023.1311125

The seismic features do not significantly reflect the thin sand body, so it is difficult to predict the reservoir. To achieve a quantitative precise prediction of the thin reservoir of the target layer in the study area, the waveform indication simulation method is used for quantitative prediction of thin reservoir thickness. Through rock physics analysis, the curve sensitive to thin layer sandstone is selected. Curve reconstruction technology is utilized to build a sensitive curve that can identify the thin reservoir in the study area. The optimal inversion parameters are selected through QC quality monitoring and comparative analysis of the test profile inversion effects. The results show that the resistivity curve and wave impedance curve in the study area are more sensitive to identify the reservoir, and the reconstructed inversion results can better identify the thin reservoir. The total thickness of the sandstone in the Fuyu oil layer ranges from 5 to 40 m, with a high-thickness area located in the southwest of the study area, generally distributed in a north-west-southeast strip. The cumulative thickness of the sandstone in the YI oil layer of Yang Da-chengzi ranges from 15 to 60 m, with a high-thickness area located in the south of the study area, generally distributed in a northwest-southeast strip, and the sand body distribution direction is similar to that of the Fuyu oil layer.

Keywords

Thin Reservoirs, Seismic Inversion, Waveform Indication Simulation, Curve Reconstruction, Reservoir Prediction

Copyright © 2023 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

随着油田勘探开发的日渐深入,要求储量勘探目标精确到小层或者单砂体,传统的反演方法已经不能满足薄储层高精度预测的要求[1]。稀疏脉冲反演分辨率提高有限,难以满足薄储层预测的需求;地质统计学反演随机性较强,反演结果的空间可靠性受井网均匀程度及井间距与沉积特征之间的匹配关系影响较大[2];地震波形指示模拟方法加入了波形相控,横向预测结果稳定可靠。

研究区扶余油层被北西向的断层切割后又在西侧齐家凹陷丰富油源供给下非常容易形成构造-岩性油藏,因此具有极大勘探开发潜力,但是高13区块扶杨油层储层单砂体厚度薄,砂地比低,横向变化快,储层预测困难大,砂体被北西向的断层切割成连续性较差的薄砂体,导致储集层砂体空间展布复杂,刻画难度大[3]-[12]。

2. 工区概况

本次研究区为高13井区,面积约30.1 km²。区域构造位置位于大庆长垣内部高台子近北东向展布的背斜构造轴部(图1),全区内具有三维地震采集数据。目的层为扶杨油层,地层厚40~166 m。

3. 地震波形指示反演的原理

“地震波形指示反演”是在传统地质统计学基础上发展起来的新的统计学方法。其基本思想是在对统计样本进行筛选时,通过综合考量波形的相似性、空间的距离等多种因素,将样本按照分布距离进行排列,使反演结果不仅在空间上反映沉积相带的限制,而且在平面上更加符合沉积规律和特征[13][14]。

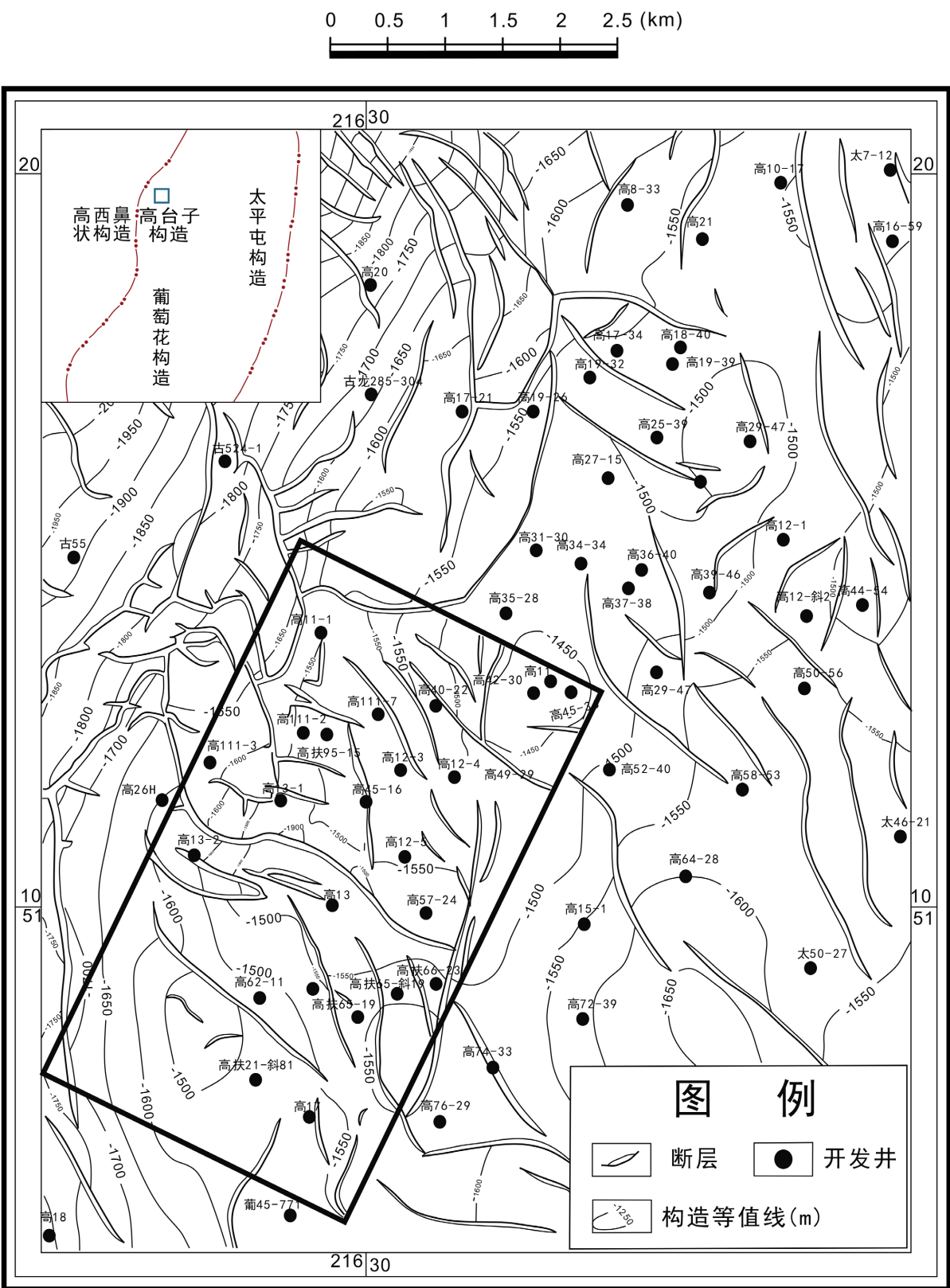


Figure 1. Location map of the study area
图 1. 研究区位置图

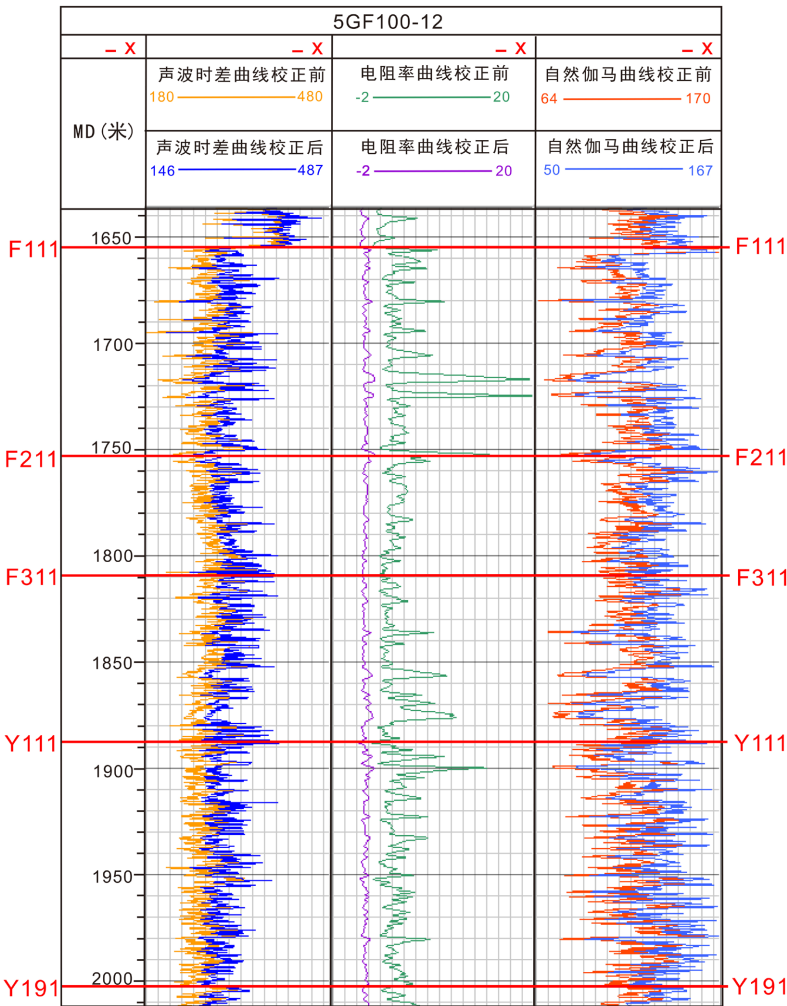
与基于变差函数的随机反演对比，波形指示反演具有高精度、低随机性的特点，从而使得反演结果逐渐变得更加准确，并且波形指示反演适用于非均匀井位的分布，此特点可以为评价 - 开发阶段的薄储层提供可靠的定量预测模型。

本研究利用三维地震数据及测井数据，首先对测井曲线处理，然后采用地震波形指示模拟方法定量预测薄储层厚度，选取对薄层砂岩敏感的曲线，采用曲线重构技术构建研究区能够识别薄储层的敏感曲线，并通过 QC 质量监控及试验剖面反演效果对比选取最优反演参数，最终实现研究区目的层薄储层的定量精细预测，落实砂岩分布特征。

4. 地震反演储层预测

4.1. 测井曲线处理

由于工区内不同年份施工，会使测井曲线产生系统性误差，因此需要对测井曲线进行标准化处理。通过概率统计直方图法，用关键井标准层段的概率统计直方图作为测井数据标准化的分析刻度模式，然后通过分析每口井同一标准层的频率分布，与标准模式进行相关对比，确定进行校正所需要的偏移量。本研究对声波时差曲线、自然伽马曲线、电阻率曲线进行标准化，由图 2 可知，标准化后目的层内曲线概率统计直方图正态分布形态较好，标准化后的曲线为薄储层反演提供必要的基础。



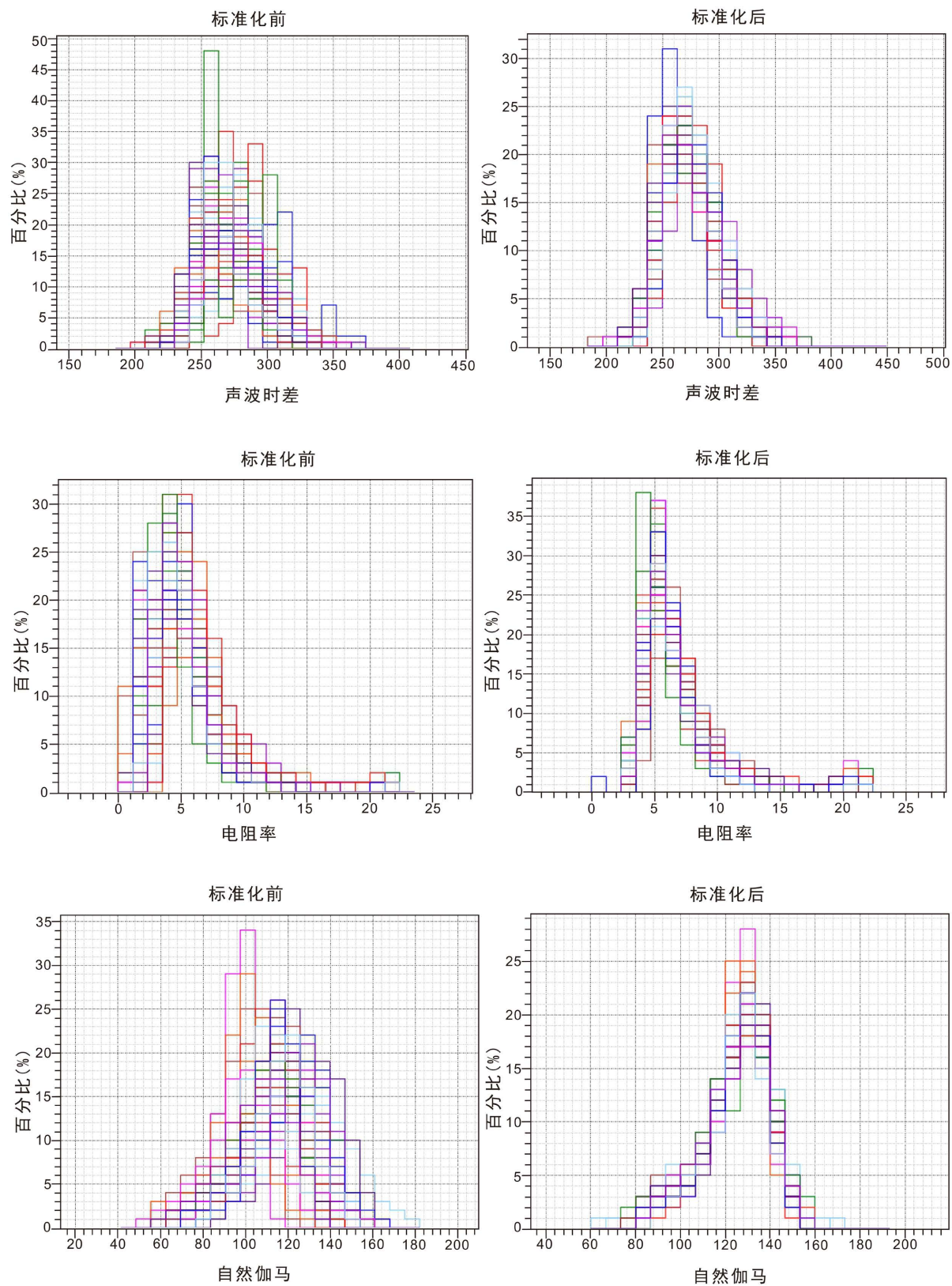


Figure 2. Comparison of curves before and after calibration and normalization

图 2. 曲线校正及标准化处理前后对比图

4.2. 合成地震记录时深标定

合成地震记录时深精细标定是反演结果可靠性的重要基础。首先需要将合成地震记录与井旁地震道波形完全对应，然后通过精细调整地震解释层位使地质分层与过井处地震解释层位吻合处理。本研究精细制作了目的层 282 口井的精细合成记录，91%的地震合成记录与井旁地震道相关系数大于 0.75，井震标定效果较可靠(图 3)。

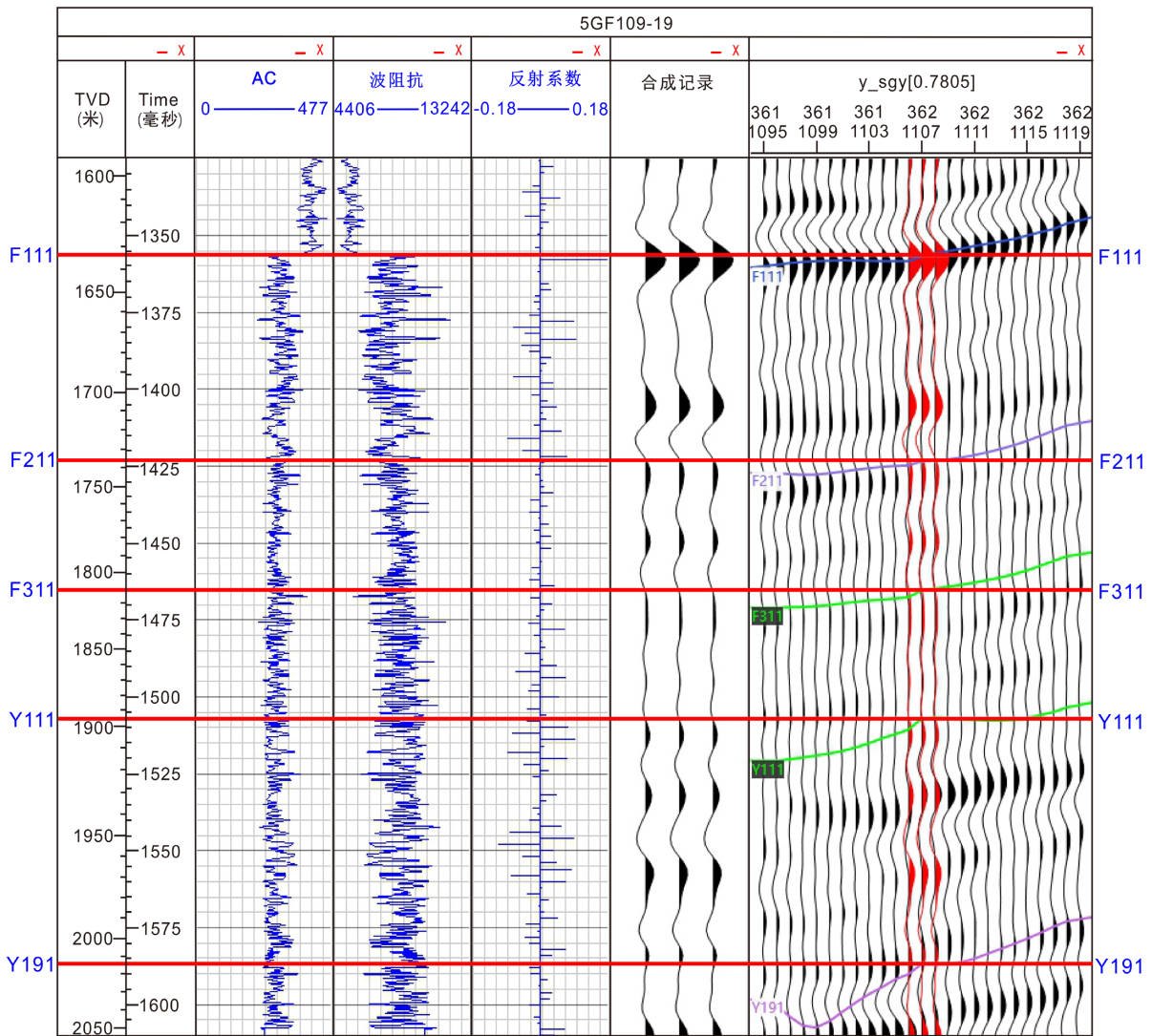


Figure 3. Seismic synthetic records of Gaofu 109-19 well
图 3. 高扶 109-19 井合成地震记录

4.3. 岩石物理分析

4.3.1. 储层敏感测井参数分析

通过砂泥岩概率直方图分析表明，电阻率曲线砂泥岩概率直方图重叠面积小，电阻率曲线识别砂泥岩分辨能力较强(图 4)。因此采用电阻率曲线和波阻抗曲线进行曲线重构，可以提高研究区对薄储层的识别能力。

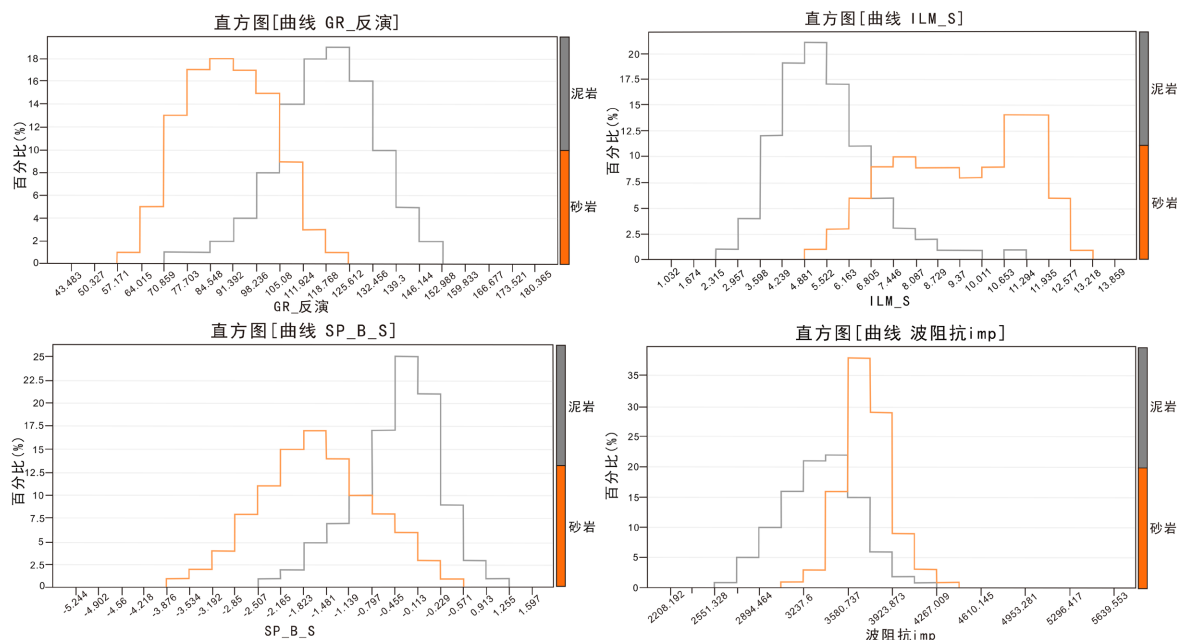


Figure 4. Histogram of the distribution of logging parameters for sandstone and mudstone in multiple wells
图 4. 多井砂岩和泥岩测井参数分布直方图

4.3.2. 曲线重构

运用 SMI 地震波形指示反演软件对曲线进行重构, 研究区的地震频率主要在 10~60 Hz 之间, 因此在对曲线进行重构时, 低于 60 Hz 的低频成分取于波阻抗曲线, 高于 60 Hz 的高频成分取于敏感曲线——电阻率曲线(图 5 左)。

重构后概率直方图砂泥岩重叠面积明显变小, 重构后波阻抗曲线对砂泥岩区分能力明显提高(图 5 右)。

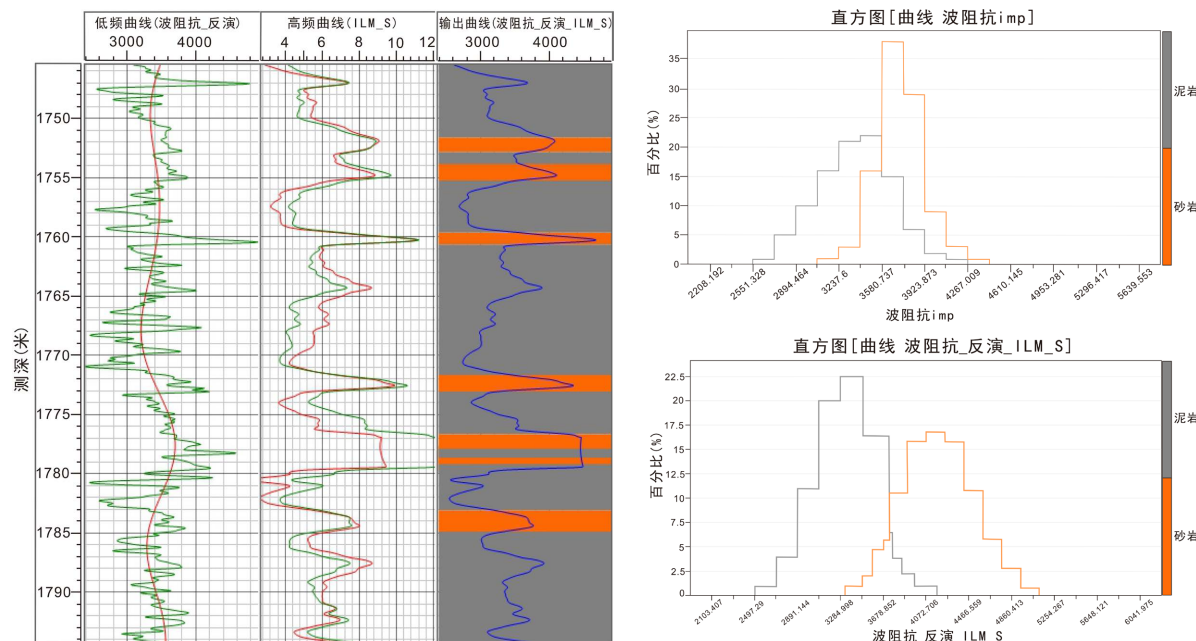


Figure 5. Comparison of probability histogram analysis before and after reconstruction
图 5. 重构前后概率直方图分析对比

分别采用重构曲线、波阻抗曲线进行波形指示模拟，通过反演试验剖面分析结果表明，采用重构曲线反演的结果比单一波阻抗曲线反演的结果更能反映薄储层特征(图 6)。

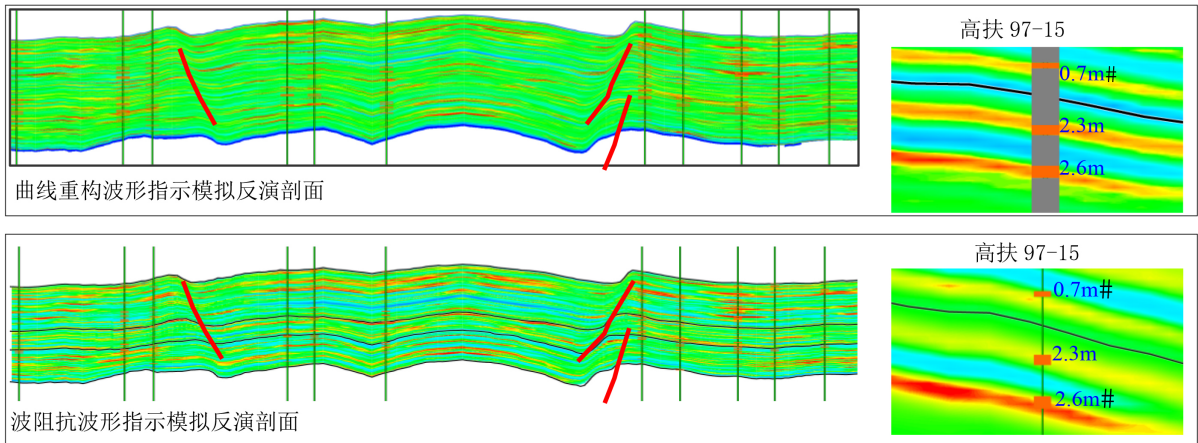


Figure 6. Comparison of inversion effect before and after curve reconstruction
图 6. 曲线重构前后反演效果对比

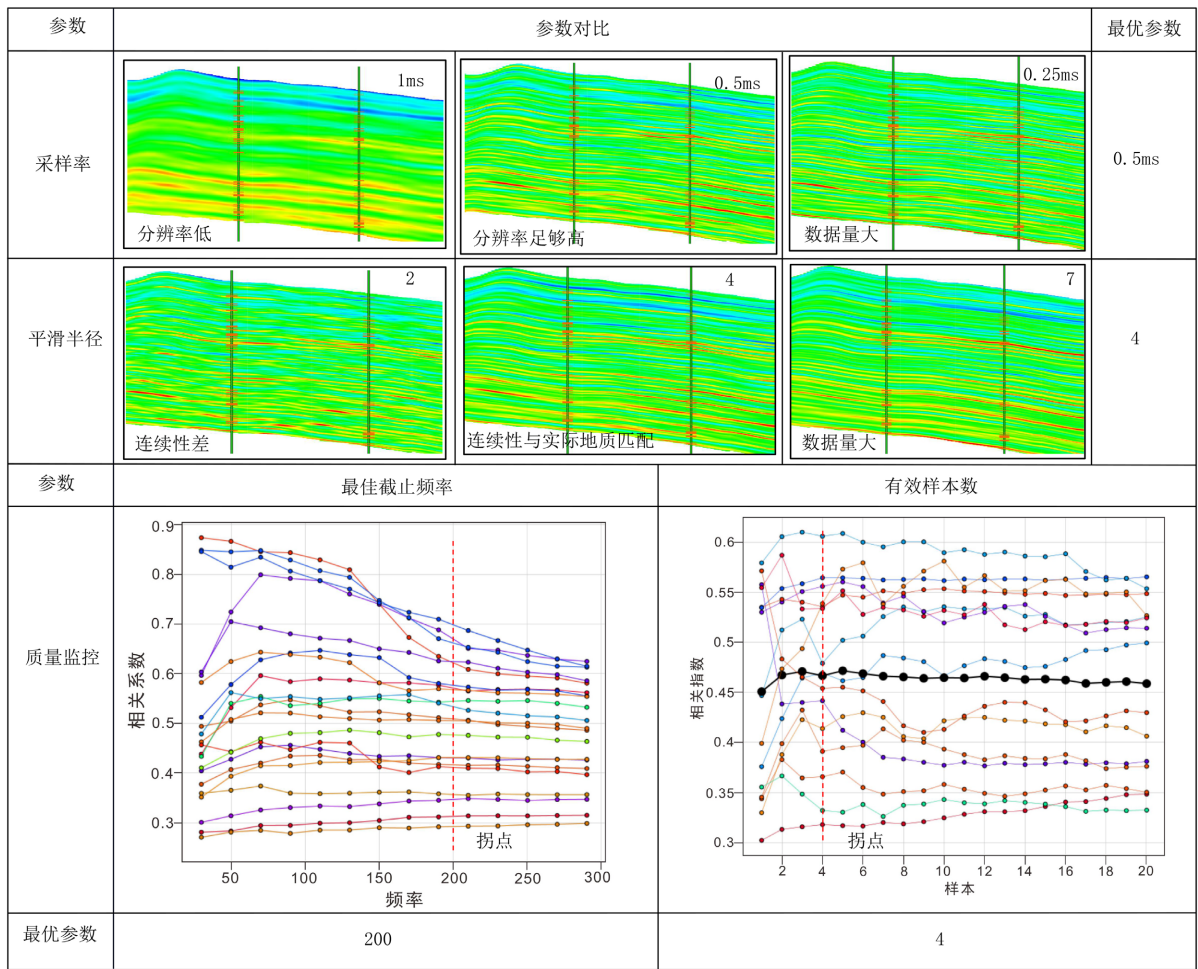


Figure 7. Optimal parameter selection
图 7. 最优参数选择

4.4. 地震波形指示模拟

4.4.1. 地震反演参数优选

采样率对反演结果的分辨率产生影响, 本研究将采样率分别设为 1 ms、0.5 ms 和 0.25 ms。分析反演剖面, 采样率为 0.5 ms 时, 对研究区薄储层砂体的分辨率更高。

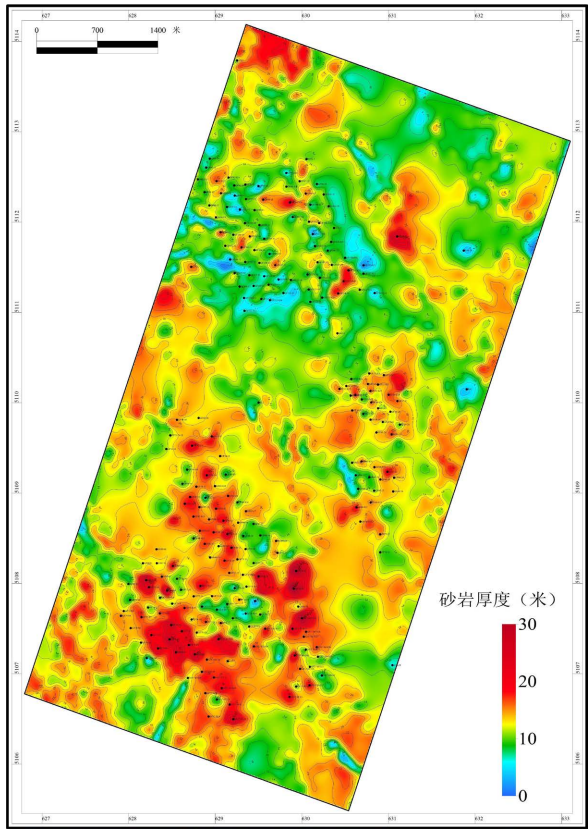
平滑半径影响反演结果的砂体连续性, 结合研究区储层砂体薄, 横向变化快的特征, 分别采用 2、4、7 的平滑半径参数进行反演剖面效果对比。通过对比分析表明, 平滑半径为 4 的反演剖面结果连续性与实际地质情况相符合。

有效样本数主要表征地震波形空间对储层的影响程度。根据已经统计好的结果对有效样本数进行设置。在一定限度内, 横轴代表有效样本数, 纵轴代表相关性, 有效样本数不断增大会引起相关性的逐渐增大, 到达一定的界限之后, 即使有效样本数仍然不断地增大, 相关性也不在随之增大, 说明有效样本数的增加无助于提高预测精度。结合研究区的资料特征, 选择有效样本数为 4。

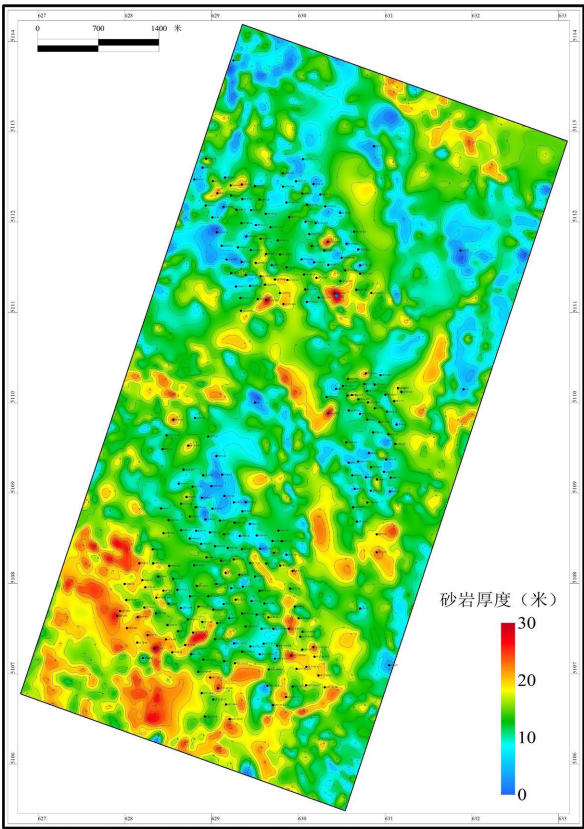
最佳截止频率决定反演结果的最高分辨能力, 但是频率越高, 会降低它的可能性。由于最佳截止频率参数与有效样本数参数两者之间存在一定的相关性, 因此选择“最佳截止频率”参数之前需要对“有效样本数”进行确定[15]。结合研究区目的层的预测需求以及对不同参数进行实验的情况, 优选最佳截止频率为 200 Hz。

经过可行性试验确定了适合研究区的反演参数。地震采样率最合适的为 0.5 ms, 平滑半径最合适的为 4。高通频率最合适的为 200, 有效样本数最合适的为 4 (图 7)。

4.4.2. 地震反演砂体预测



(a) FI 油层组砂岩厚度预测图



(b) FII 油层组砂岩厚度预测图

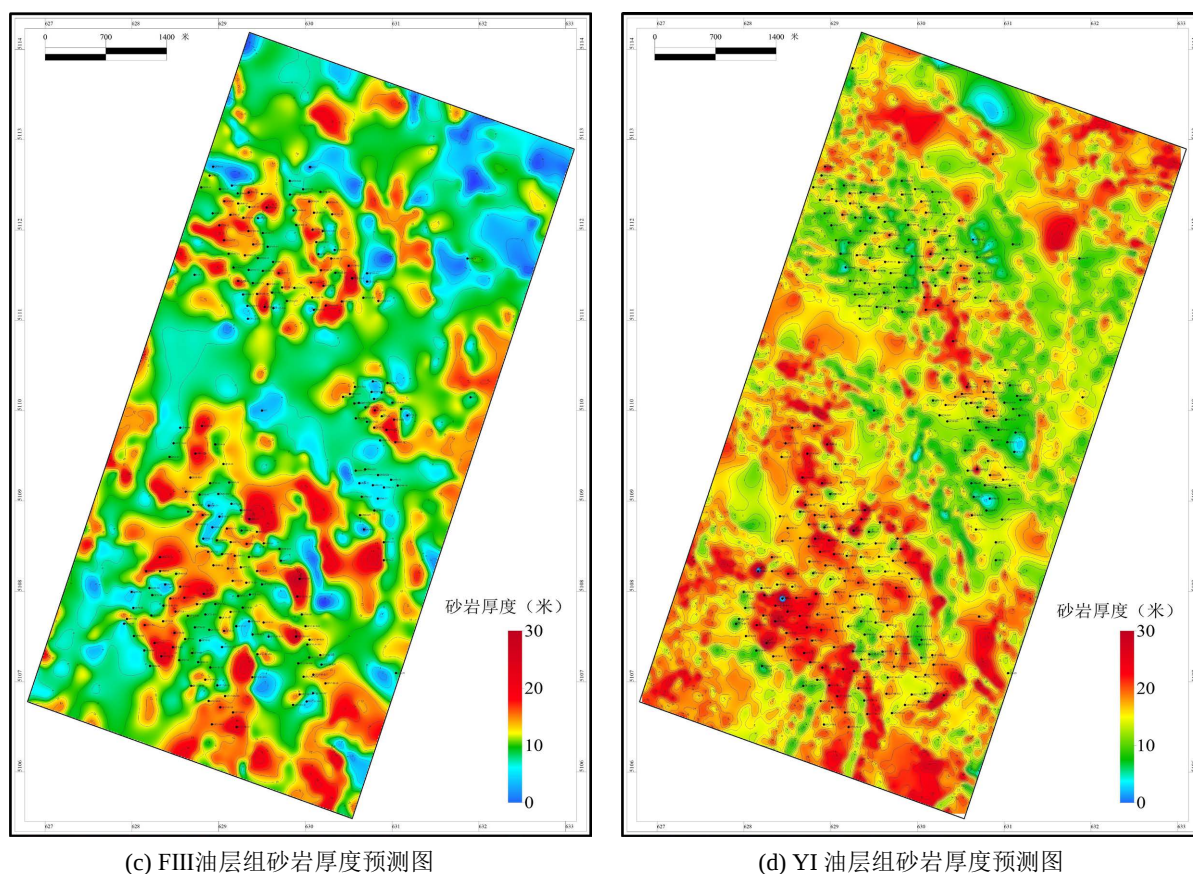


Figure 8. Predicted sandstone thickness of FI, FII, FIII and YI oil formation groups

图 8. FI、FII、FIII、YI 油层组砂岩厚度预测图

对研究区目的层薄储层的定量精细预测，得到研究区内 4 个油层组砂岩厚度预测图，分析具有如下特征。

FI 油层组砂岩累计厚度在 10~40 m 之间，平均厚度 27 m。砂岩发育区呈北西 - 南东向条带状展布，厚度高值区位于研究区西南部(图 8(a))。

FII 油层组砂岩没有 FI 油层组发育，砂岩累计厚度在 5~40 m 之间，平均厚度 18 m。砂岩发育区呈北西 - 南东向条带状展布，厚度高值区位于研究区西南部(图 8(b))。

FIII 油层组砂岩累计厚度在 7~36 m 之间，平均厚度 22 m。砂岩发育区呈北西 - 南东向条带状展布，砂岩厚度高值区位于研究区南部(图 8(c))。

YI 油层组砂岩较 FI、FII、FIII 油层组都发育，砂岩累计厚度在 15~60 m 之间，平均厚度 40 m。砂岩发育区呈北西 - 南东向条带状展布，厚度高值区位于研究区南部。砂体展布方向与扶余油层相似(图 8(d))。

5. 结论

1) 采用地震波形指示模拟方法可以利用地震波形特征代替变差函数分析储层空间结构变化，有效地提高横向分辨率且更符合平面地质规律。

2) 用电阻率曲线重构的波阻抗曲线进行反演，需要对曲线进行标准化、归一化处理，以保证曲线重构的质量能反映薄储层的特征。

3) 研究区电阻率砂泥岩概率直方图重叠面积较少, 可以作为识别砂泥岩的敏感参数, 通过对波阻抗曲线和电阻率曲线重构, 重构后的波阻抗曲线能够反映地层速度和波阻抗的变化, 且提高了对砂泥岩的区分能力。在此基础上进行地震波形指示模拟, 其结果不仅与井震资料吻合度高, 而且提高了传统地震资料的分辨率以及对薄储层预测的精度。

基金项目

重庆科技学院研究生创新计划项目“高 13 区块扶余油层致密储层地震预测方法研究”(立项编号: YKJCX2220120)资助。

参考文献

- [1] 杜伟维, 金兆军, 邸永香. 地震波形指示反演及特征参数模拟在薄储层预测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2017, 14(1): 56-61.
- [2] 周超宇. 地质统计学地震反演技术在溱潼南华地区薄砂层的预测应用[J]. 非常规油气, 2018, 5(4): 23-26.
- [3] 咎春景. 长春岭地区扶余油层构造分析与储层预测[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2022.
- [4] 杨敬芳. 汪家屯气田扶余油层储层预测与地质建模[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2018.
- [5] 黄楠. 塔北英买力地区白垩系舒善河组滩坝薄储层预测[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国石油大学, 2018.
- [6] 刘慧楠. 松辽盆地南部 X 区块井震结合储层预测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2022.
- [7] 李健. 井震结合解释技术在大庆敖 155 区块扶余油层储层预测的应用[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2017.
- [8] 梁建刚, 秦喜林, 匡海阳, 等. 自然伽马曲线重构波阻抗反演在勘探含铀有利成矿砂体中的尝试[J]. 中国地质, 2023, 50(2): 347-358.
- [9] 刘海涛, 何志勇. 曲线重构技术在伦坡拉盆地储层预测中的应用[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2022, 24(3): 39-44.
- [10] 余为维, 冯磊, 杜艳艳. 基于特征曲线重构的波阻抗反演在复杂储层预测中的应用[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(4): 58-65.
- [11] 余婧. 基于曲线重构的储层预测技术研究[J]. 当代化工研究, 2018(11): 88-89.
- [12] 黄伟. 大庆长垣高台子工区三维地震精细构造解释及储层预测[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2010.
- [13] 张伟健. 芳 22-芳 36 区块扶余油层精细构造解释及储层预测[D]: [硕士学位论文]. 大庆: 东北石油大学, 2020.
- [14] 钱银磊, 胡清雄, 王晓辉, 等. 地震波形指示反演在薄储层预测中的应用[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2017, 19(6): 17-20.
- [15] 章雄, 张本健, 梁虹, 等. 波形指示叠前地震反演方法在致密含油薄砂层预测中的应用[J]. 物探与化探, 2018, 42(3): 545-554.