

# 陇东地区X井区特低渗储层物性改造地震预测研究

张杰<sup>1</sup>, 张学娟<sup>2</sup>, 王涵<sup>2</sup>, 曾亚丽<sup>1</sup>, 高改<sup>1</sup>, 冯丽<sup>2</sup>, 余海燕<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院, 陕西 西安

<sup>2</sup>重庆科技学院石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2023年9月14日; 录用日期: 2023年11月18日; 发布日期: 2023年11月27日

## 摘要

陇东地区X井区长8<sub>12</sub>油层组属于典型的低孔、特低渗储层, 需要借助压裂储层物性改造技术开发储层。为了有效预测研究区目的层剩余油分布, 进一步落实开发部署方案, 亟需对改造后的储层物性进行定量预测。本文以相邻工区压前-压后声波曲线建立数学关系, 利用研究区声波曲线换算压后声波值, 并通过声波与孔隙度的拟合关系计算研究区压后孔隙度曲线, 结合压裂后三维地震数据, 采用地震波形指示反演, 定量预测研究区目的层物性改造后的储层物性。孔隙度地震预测平面结果表明, 压裂区域平均孔隙度明显高于周围区域, 且孔隙度预测值分布范围与实际相符, 预测结果可靠。

## 关键词

低渗透储层, 储层预测, 压裂, 物性改造, 物性预测

# Seismic Prediction of Physical Modification of Extra-Low Permeability Reservoirs in X-Well Zone, Longdong Area

Jie Zhang<sup>1</sup>, Xuejuan Zhang<sup>2</sup>, Han Wang<sup>2</sup>, Yali Zeng<sup>1</sup>, Gai Gao<sup>1</sup>, Li Feng<sup>2</sup>, Haiyan She<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an ShaanXi

<sup>2</sup>School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Sep. 14<sup>th</sup>, 2023; accepted: Nov. 18<sup>th</sup>, 2023; published: Nov. 27<sup>th</sup>, 2023

## Abstract

Chang 8<sub>12</sub> oil layer group of the Longdong oilfield is a typical low porosity and ultra-low permea-

文章引用: 张杰, 张学娟, 王涵, 曾亚丽, 高改, 冯丽, 余海燕. 陇东地区 X 井区特低渗储层物性改造地震预测研究[J]. 地球科学前沿, 2023, 13(11): 1302-1309. DOI: 10.12677/ag.2023.1311124

bility reservoir, which is necessary to develop reservoirs by means of fracturing reservoir physical property modification technology. In order to achieve effective prediction of the remaining oil in objective intervals and further implement the development and deployment plan, it is necessary to quantitatively predict reservoir physical properties after reconstruction. In this paper, the mathematical relationship is established based on adjacent area pre- and post-compression acoustic curves. The acoustic wave value after pressure is converted by using the acoustic wave curve of the study area, and the post-compression porosity curve of the study area is calculated by the fitting relationship between the acoustic wave and porosity. Combined with 3D seismic data after fracturing, seismic waveform indication inversion is used to quantitatively predict the reservoir physical property of the objective interval in the study area. Porosity seismic prediction plane results show that the average porosity of the fractured area is significantly higher than that of the surrounding area and the predicted distribution range of porosity is consistent with the actual, the predicted results are reliable.

## Keywords

Low Permeability Reservoir, Reservoir Prediction, Fracturing, Physical Property Modification, Physical Property 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

研究区位于鄂尔多斯盆地陕北斜坡西南部,是长庆油田发现的一个亿吨级大油田,其主力含油层为长8油层组[1]。该区长8油层组砂体连续性好,油层具有大面积连片分布的特征,长8<sub>12</sub>油层组是研究区主力产油层,其主砂体宽3~6 km (8~15 km),厚12~24 m,探井实测资料表明,主砂体平均孔隙度10.6%,渗透率 $1.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  [2]。研究区目的层储层非均质性强,属于典型的低孔特低渗储层[3],因此需要借助压裂改造技术开发储层,改造前后人工裂缝的产生会使储层物性及渗流特征发生了很大变化。人工压裂储层改造后研究区储层的孔渗特征预测是研究区剩余油预测及后期生产及开发部署亟待解决的必要问题。

研究区具有压裂后采集的三维地震资料,为压后物性地震预测提供了必要基础,参考邻区压裂前后声波曲线数据变化关系及研究区声波曲线资料,进行储层物性改造后井震联合储层物性地震预测,定量预测研究区目的层压裂后储层物性。

## 2. 地震反演预测储层物性

### 2.1. 物性预测反演方法

地震方法是储层物性预测不可或缺的手段,近半个世纪期间,主要出现了7种储层物性地震预测的方法技术。其中大部分方法是通过反射地震数据反演得到地层的声阻抗,再借助理论和实验手段得到声波阻抗与物性的数学关系,进而由储层物性和阻抗间的关系进行储层物性的间接反演[4]-[11]。而其中由地震数据反演声波信息的反演方法对物性预测起到重要的作用。

波形指示反演是在地震波形特征指导下(相控)对反射系数组合寻优的过程。该反演方法是近年兴起的较可靠的高分辨率地震反演方法。三维地震反映了沉积环境和岩性组合的空间变化[12],波形指示反演利

用地震波形相似性优选相关井样本, 参照样空间分布距离和曲线分布特征建立初始模型, 代替变差函数分析空间变异结构, 对高频成分进行无偏最优估计[13]。地震波形指示反演基于“地震波形指示的马尔科夫链蒙特卡罗随机模拟(SMCMC)”专利算法, 采用“相控随机模拟”思想, 有效提高了储层预测的精度和可靠性, 尤其适用于横向变化快且非均质性强的薄互层(1~2 m 以上)的高精度预测[14]。波形指示反演实现了在薄层预测的基础上, 利用相控思想, 最大可能的保证乐平面预测规律的可靠性[15]。

波形指示反演实际技术流程如图 1 所示, 以储层改造后三维地震数据体及地震解释层位为基础, 首先利用储层改造前声波时差数据进行曲线校正, 结合邻区压裂前后声波时差关系换算储层改造后声波时差; 结合地震解释层位建立初始地质模型; 开展波形指示反演参数及效果测试, 确定最佳反演参数, 迭代优化反演结果、使反演结果的正演记录与地震数据残差逐渐减小达到波形反演期望后; 迭代修改的反演结果为最终的地震反演声波时差预测结果; 在此基础上结合孔隙度与声波时差关系由声波反演体转换为储层孔隙度预测结果。

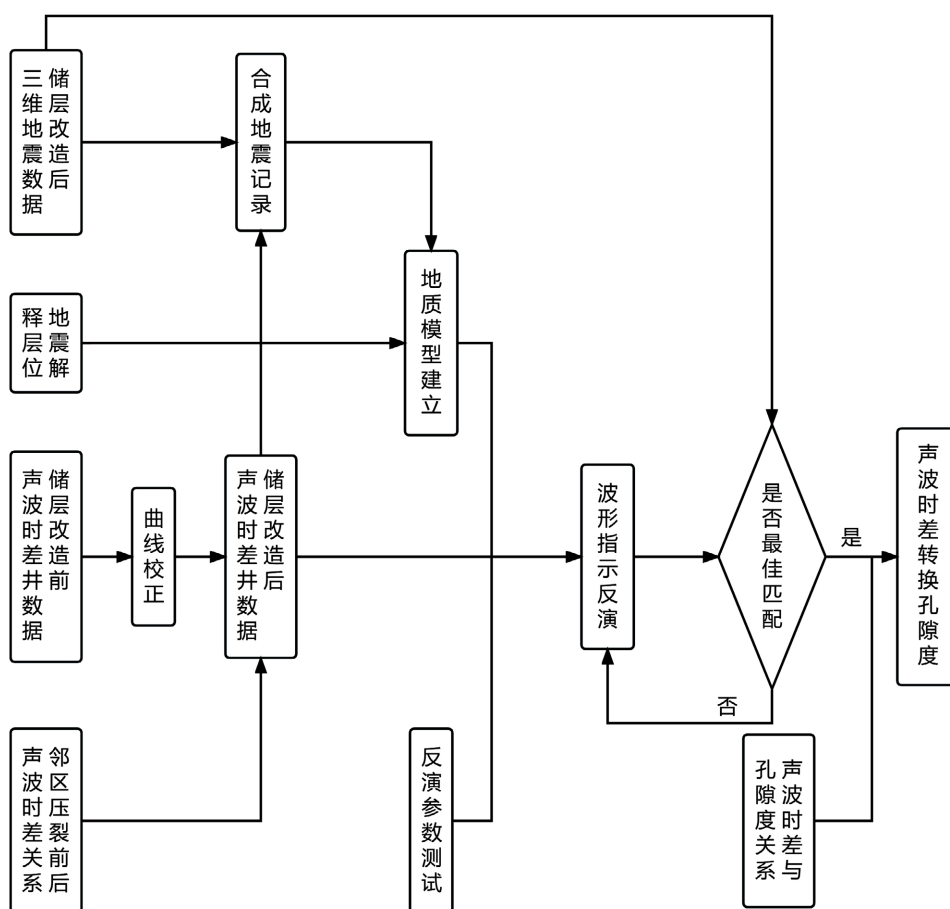


Figure 1. Flow chart based on waveform inversion technology  
图 1. 基于波形的反演技术流程图

## 2.2. 基础数据分析及预处理

研究区三维地震数据为人工压裂后采集, 采集面元  $20\text{ m} \times 40\text{ m}$ 、采样间隔  $2\text{ ms}$ , 目的层主频为  $40\text{ Hz}$ 、频带有效宽度可达  $65\text{ Hz}$ , 地震分辨率及品质相对较好(图 2), 为本次研究提供必要的储层改造后地震数据体。

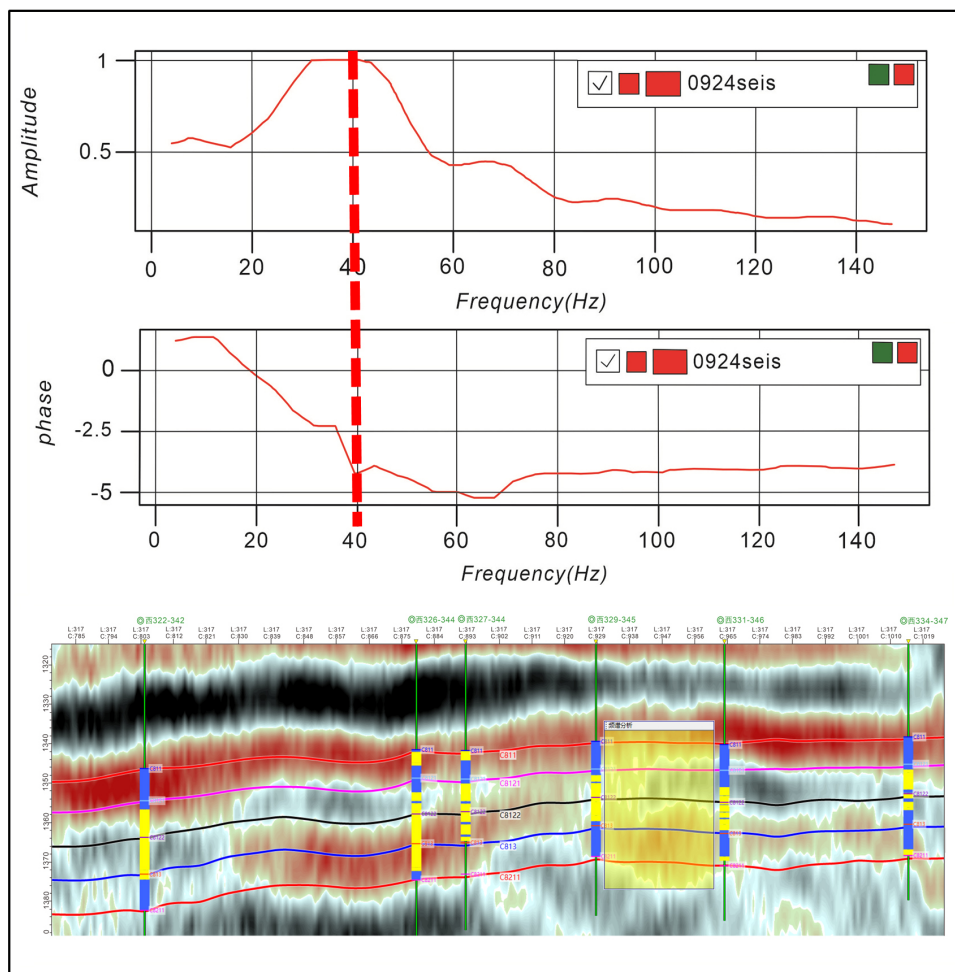


Figure 2. Seismic reflection characteristics and spectral analysis of objective interval  
图 2. 目的层地震反射特征及其频谱分析图

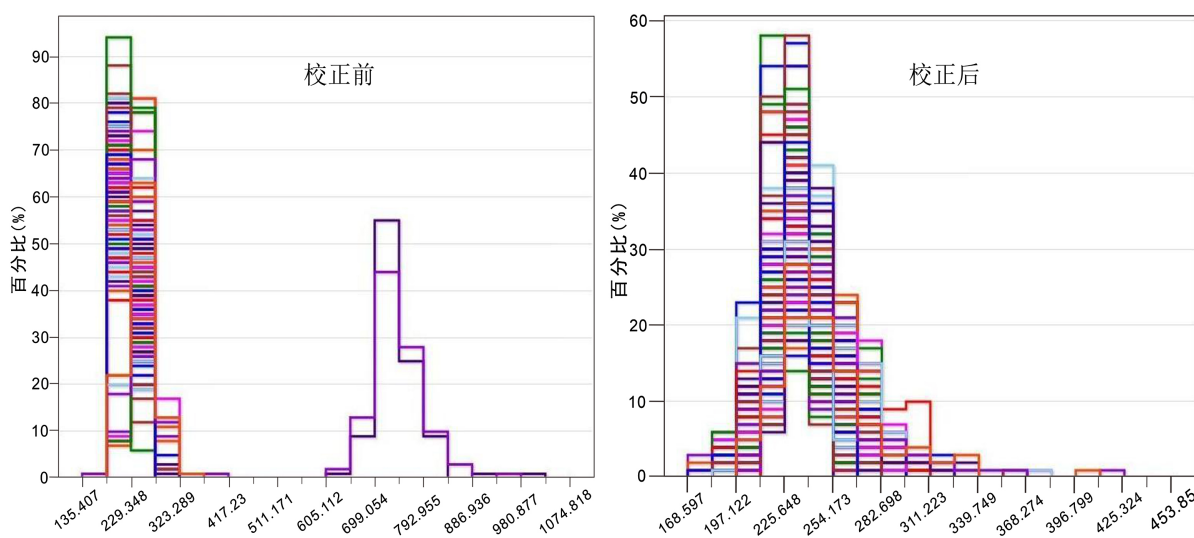


Figure 3. Probability histogram of curves before and after correction  
图 3. 曲线校正前后概率直方图

由于测井曲线采集年度、仪器系列、钻井参数、人员等因素，使同类曲线间存在一定的误差，影响储层预测，需要曲线去奇异值等预处理并进行标准化处理。处理后曲线概率直方统计图峰值重叠、形态近似(图 3)，曲线标准化处理是反演取得可靠结果的重要基础之一。

### 2.3. 压裂后测井曲线换算

研究区具有压裂前测井曲线系列，需要结合邻区井压裂前后资料信息，建立曲线压裂前后关系，由压裂前测井曲线换算为压裂后的测井曲线(图 4)。由此获得与压裂后地震数据匹配的测井曲线信息。

利用研究区邻近工区同井压裂前后声速变化，分析压裂前后孔隙度变化。根据具备数据的三口井声波时差压裂前后对比统计发现，压裂稳定后声波速度减少范围在 0.2%~12.9%之间，平均声波速度减少 4.1%。

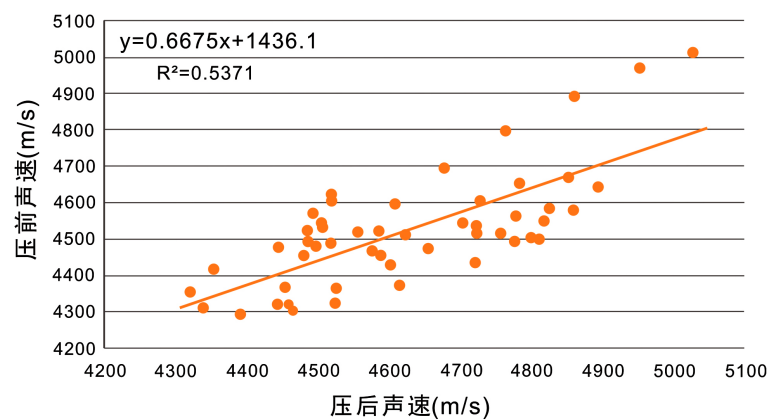


Figure 4. Acoustic time difference diagram before and after fracturing  
图 4. 压裂前后声波时差关系图

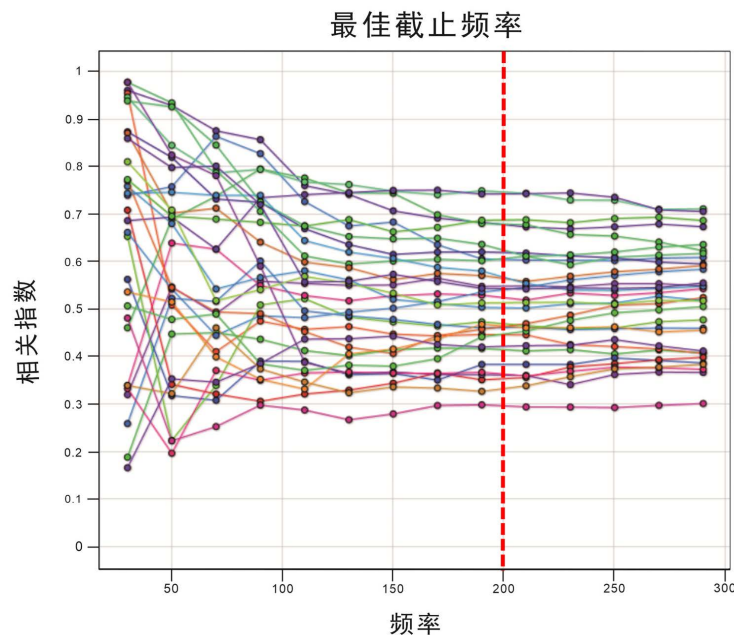


Figure 5. Cutoff frequency quality control diagram  
图 5. 截止频率质量控制关系图

## 2.4. 反演关键参数

结合研究区目的层地质沉积规律及砂岩统计数据调试各反演参数，通过反演剖面效果及 QC 质量控制确定能够反映研究区砂体厚度及结构分布的反演参数(图 5)。有效截止频率是影响基于波形的反演效果的重要参数之一，有效截止频率越高则反演结果分辨率越高，但同时也增加了反演结果的不确定性，剖面特征结合 QC 质量控制参数确定研究区最佳截止频率为 200 Hz。

## 3. 波形指示反演孔隙度预测结果

### 3.1. 孔隙度预测剖面结果

声波与孔隙度具有较好的线性拟合关系，孔隙度越大、岩石地震波传播速度越低则声波时差会越大。利用研究区声波时差曲线与孔隙度数据拟合可得到二者研究区具有如下数学关系：

$$\text{por} = 0.2268 * \text{AC} - 40.488 \quad (1)$$

因此可利用该数学关系将压后声波时差波形指示反演预测结果转换为孔隙度反演预测数据体。

通过研究区储层物性反演连井剖面分析可知：储层物性反演结果与井数据吻合较好；顺物源方向较垂直物源反演剖面物性联通性好，反演结果即能反映研究区砂体分布规律，也能反映砂体内部物性的变化规律(图 6)。从反演预测结果的剖面来看，反演结果能够反映基本地质规律且单井吻合较好。

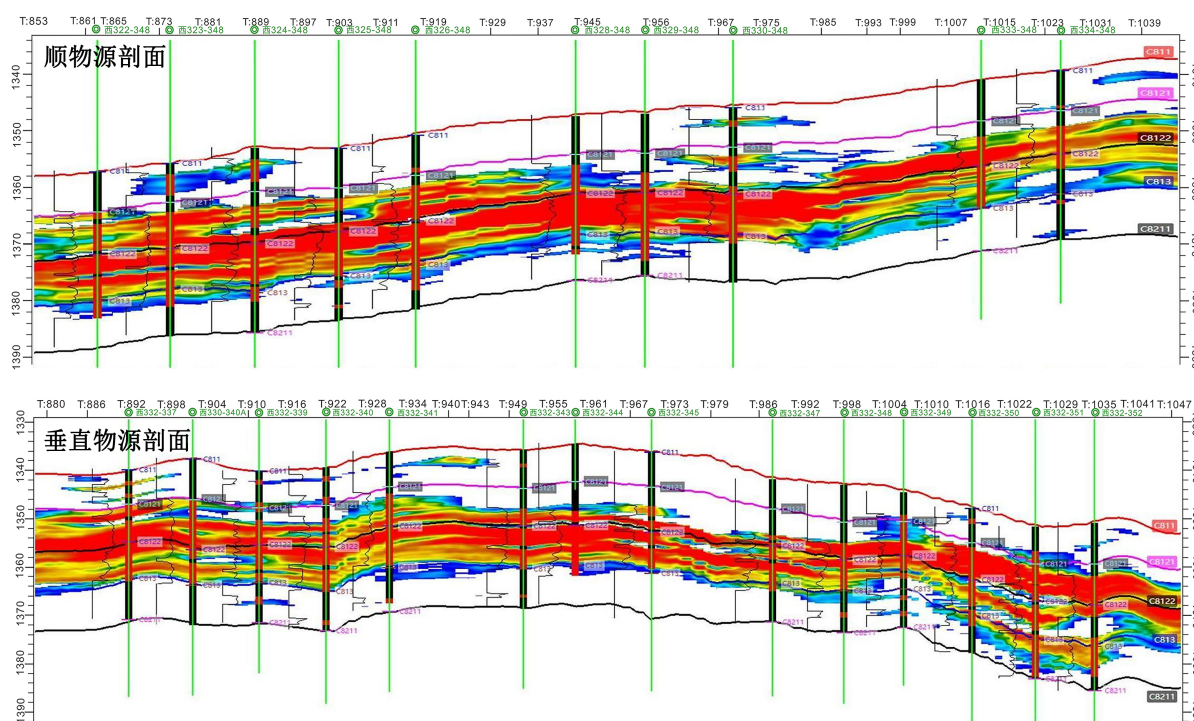


Figure 6. Porosity prediction profile after reservoir reconstruction

图 6. 储层改造后孔隙度预测剖面图

### 3.2. 孔隙度预测平面结果

由三维地震反演孔隙度地震反演数据体可计算得到目的层平均孔隙度平面图，如图 7。平面结果表明，压裂区域平均孔隙度明显高于周围区域，且孔隙度预测值的值域分布范围与实际相符。

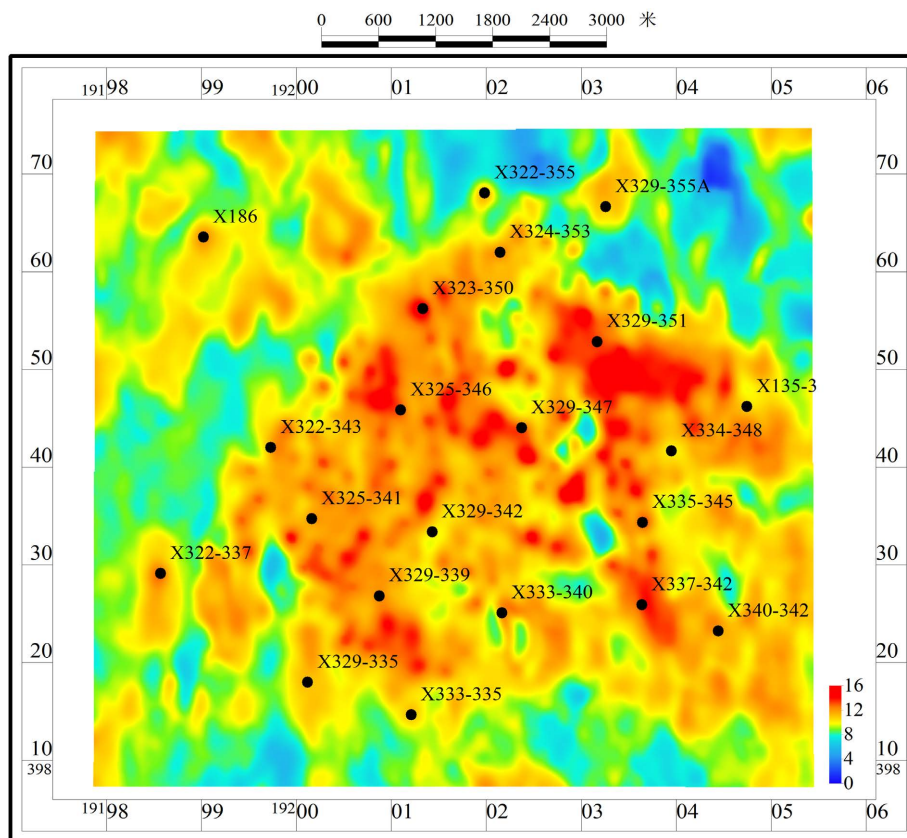


Figure 7. Prediction map of average porosity of chang 812 member in the study area

图 7. 研究区长 812 层段平均孔隙度预测图

#### 4. 结论

1) 储层物性人工压裂改造后地震预测, 必须具备压裂后三维地震数据及压裂后井数据; 通过压裂前后声波曲线建立压裂前后物性变化数学关系, 进而将压裂前井曲线数据转换为压裂后的数据, 从而实现压裂后储层物性的地震预测。

2) 陇东地区 X 井区特低渗储层物性改造后, 采用井震结合地震反演方法进行物性地震预测结果能够反映地质规律, 对该地区油藏描述及开发开采都具有重要的实际意义。

#### 基金项目

重庆市自然科学基金面上项目: 基于压裂效果的页岩脆性定量评价方法研究(立项编号: cstc2021jcyj-msxmX0984)。

#### 参考文献

- [1] 栗业. 鄂尔多斯盆地西峰地区长 8 储层特征及有利区优选[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北大学, 2018.
- [2] 于波, 崔智林, 刘学刚, 等. 西峰油田长 8 储层砂岩成岩作用及对孔隙影响[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(3): 405-410.
- [3] 王茜. 西峰地区长 81 致密砂岩储层评价及有利区优选[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安石油大学, 2019.
- [4] 韩宏伟, 程远锋, 张云银, 等. 储层物性的地震预测技术综述[J]. 地球物理学进展, 2021, 36(2): 595-610.
- [5] 王连刚, 李俊乾. 地震技术在煤层气储层研究与物性预测中的应用[J]. 资源与产业, 2010, 12(2): 158-162.

- 
- [6] 陈波, 胡少华, 毕建军. 地震属性模式聚类预测储层物性参数[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(2): 204-208.
- [7] 刘军, 文晓涛, 张雨强, 等. 火成岩储层物性参数叠前地震反演[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(5): 1985-1992.
- [8] 巴晶, 方志坚, 符力耘, 等. 基于可变临界孔隙度模型的致密砂岩储层参数地震反演方法[J]. 地球物理学报, 2023, 66(6): 2576-2591.
- [9] 邢文军, 曹思远, 陈思远, 等. 基于谱反演方法的叠后纵波阻抗反演[J]. 物探与化探, 2023, 47(2): 429-437.
- [10] 孙颖, 武刚, 梁斌, 等. 基于拓频的高分辨率多子波地震反演技术在苏 X 区块的应用[J]. 录井工程, 2023, 34(2): 88-94.
- [11] 赵晨, 郭淑文, 金凤鸣, 等. 基于优化 MCMC 算法的地震弹性阻抗反演方法[J]. 矿产与地质, 2023, 37(3): 587-596.
- [12] 陈彦虎. 震波形指示反演方法、原理及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2021.
- [13] 魏敏, 守济, 秀朋. 波形指示反演在准中庄 3 工区薄储层预测中的应用[J]. 石油物探, 2021, 60(4): 643-651.
- [14] 高君, 毕建军, 赵海山, 等. 地震波形指示反演薄储层预测技术及其应用[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 142-145.
- [15] 陈彦虎, 毕建军, 邱小斌, 等. 地震波形指示反演方法及其应用[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1149-1158.