

基于相控的反演在薄储层预测中的应用

林东升, 张福顺, 何宏, 李建交

中国石化石油勘探开发研究院, 北京

收稿日期: 2022年11月15日; 录用日期: 2022年12月24日; 发布日期: 2022年12月31日

摘要

塔河油田卡拉沙依组埋藏深大、储层薄, 砂泥岩波阻抗区分困难, 传统的反演方法无法满足勘探的需求。地震波形指示反演是一种从三维地震资料出发, 在沉积规律的约束下, 通过查找相同沉积环境下的测井曲线中包含的相似特征, 对有限的地震先验样本点开展模拟的反演方法。通过对测井曲线分析, 寻找可以有效区分岩性的曲线, 使用基于相控的反演方法, 提高了薄储层的识别精度, 反演结果与井上稳合率较高。并在等时地层切片技术的辅助下, 实现了对研究区薄砂层的平面展布描述, 符合地质规律。该方法充分体现了相控反演的思想, 为岩性油气藏精细勘探、薄储层预测等难点提供了一种新的方法。

关键词

波形指示反演, 储层预测, 石炭系, 薄储层

Application of Phase-Controlled Inversion to Thin Reservoir Prediction

Dongsheng Lin, Fushun Zhang, Hong He, Jianjiao Li

Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing

Received: Nov. 15th, 2022; accepted: Dec. 24th, 2022; published: Dec. 31st, 2022

Abstract

The Carboniferous Karashayi Formation of the Tahe oilfield is characteristic of deeply buried reservoir and thin reservoir. It is difficult to distinguish the impedances of sandstone and mudstone. The traditional inversion can't meet the needs of exploration. Seismic waveform indicating inversion is a method which mining common structural information contained in logging curves of the same sedimentary environment from seismic by under the guidance of sedimentary, simulate finite sample point of seismic. The prediction accuracy of thin sand layer is improved by seismic waveform indicating inversion using optimization of lithology sensitive curve.

The coincidence rate of inversion and participating well is high, and the rate of inversion and post inspection well is also very high. With the aid of isochronous stratigraphic slicing technology, the plane distribution description of the thin sand layer in this area is realized, which conforms to the geological law. This method fully embodies the idea of phase controlled inversion, and provides a new method for fine exploration and thin reservoir prediction of lithologic reservoirs.

Keywords

Seismic Waveform Indicating Inversion, Reservoir Prediction, Thin Reservoir, Carboniferous

Copyright © 2022 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

近年来在塔里木盆地的碎屑岩领域的立体勘探评价中,发现在塔河油田桑塔木地区石炭系卡拉沙依组油气显示十分活跃,成为继奥陶系之外的新增储量的又一个重要含油层系,主要为薄互层岩性圈闭。地质研究表明该区为辫状河三角洲-潮坪沉积体系,受河流和潮汐双重水流的作用。砂体具有展布面积大、砂层厚度薄、横向上变化较快等特点,储层预测困难,成为制约该区勘探开发的重要瓶颈之一。前人在反演方法上,尝试了各种叠前、叠后反演方法,但是受限于该区的三维资料主频不高,根据传统反演理论计算最低仅可识别 25 米的砂体,均无法满足薄层砂体刻画的需要。本次研究通过选取钻井程度较高的区域,对井曲线和地震波形等特征综合研究,确立了使用基于相控的地震波形指示反演方法,并综合使用地震沉积学的关键技术,通过精细解释得到等时地层格架,生成合乎地质特征的虚切片,实现了对研究区缓坡背景下的薄储层预测。

2. 地震波形指示反演原理

目前应用广泛应用于薄储层预测的地质统计学反演是一种基于随机模拟的反演方法[1] [2] [3]。这种方法通过分析有限的样本来表征空间的变异程度,来估计预测点的高频成份。地震数据体的作用主要是以后验的方式来保障中频部分符合地震特征。但是地质统计学反演方法也存在局限性,其模拟结果严重依赖于井的分布情况[4] [5]。并且地质统计学反演使用的核心算法变差函数结果具有随机性,主要是依靠工程师的经验对变程参数设置,强烈依赖算法自身,与地震数据结合较少,计算结果会出现偏颇,不能真正描述地质体特征。

地震波形指示反演,本质上也是统计学反演,但其更多的将地震波形信息融入到统计过程中。该方法如图 1 所示,是通过算法寻找相似波形对应的测井曲线具有的相同特征,达到模拟地震先验样本的目的。该方法通过挖掘地震波形特征的相似性与样本点空间距离两个因素,首先对样本结构特征保证一致性,再按照统计样本点的分布距离排序,优选井震关联度高的样本建立初始模型[6] [7] [8]。这种反演方法,充分贯彻了相控反演的思维,深度挖掘了三维数据里蕴含的沉积环境和岩性信息,使得反演结果更加符合地质认识。波形指示反演方法革新了井震结合方法,有效地减少了地震噪声对反演的干扰。反演的过程更加注重原始地震波形的信息,改变了过分依赖变差函数解决井间过渡问题,使得反演的结果确定性增强,更加注重挖掘三维数据体里空间结构变化[9] [10]。

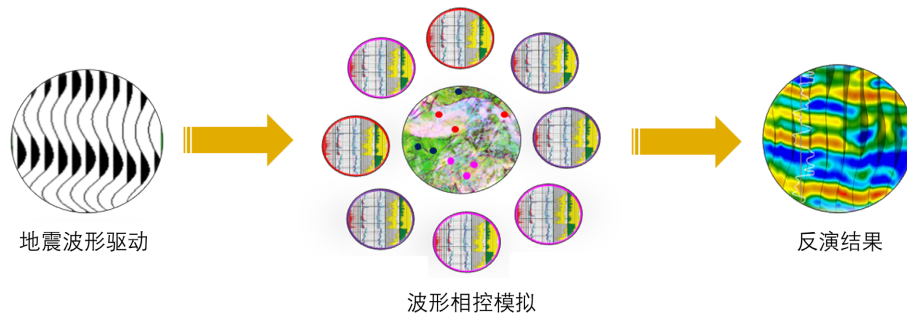


Figure 1. The inversion principle of seismic waveform indicator
图 1. 波形指示反演基本原理

3. 地震波形指示反演的步骤

1) 分析钻井目的层对应的地震波形特征，选取已知井的波形特征相似度高的样本点，并记录空间距离信息，统计样本点的纵波阻抗。通过这些优选出的与已知井相似度高的地震波形参与建立初始低频模型(图 2) [11]。

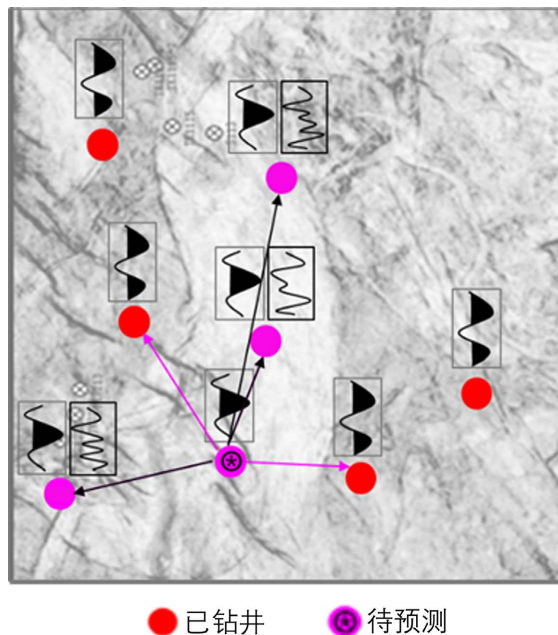


Figure 2. Preferred sample of waveform indication
图 2. 波形指示优选样本

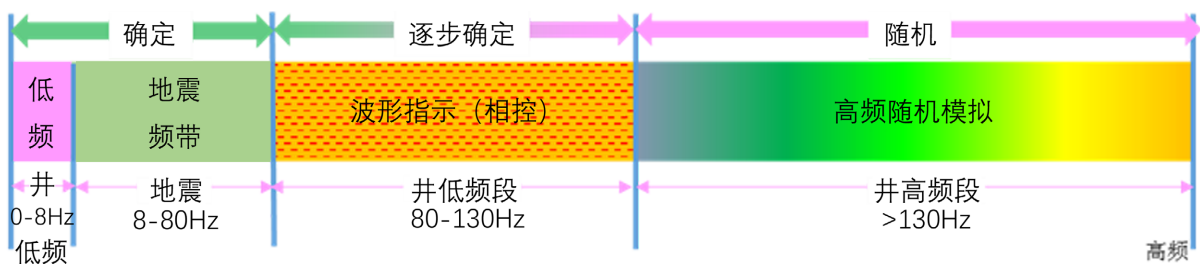


Figure 3. Inversion frequency analysis diagram
图 3. 反演频率分析图

2) 通过对地震数据的不同频带阻抗体与建立的初始模型进行匹配计算, 获取似然函数。井点的样本点的波形特征反映了其沉积环境。如果不同样本点的地震波形表现出相似特征, 由于其沉积环境大致相同, 低频部分表现是一致的, 而高频部分的不同则是因为沉积微相不同。具有共性的井曲线所对应的频带范围比地震有效频带(图 3)要宽很多, 因此可以合理确定高频的取值, 增加低频模型的准确性[12] [13]。

3) 通过使用前两步得到的似然函数分布和先验样本点分布, 得到后验概率分布。构建目标函数, 求取能使后验概率分布最大的几组值, 取其均值, 设为期望值(图 4)。

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \tag{1}$$

上面公式(1)中, 左侧 $Z(x_0)$ 代表待计算的未知样本点的值, 这个值由参与计算的 n 个样本点值加权求和算得。

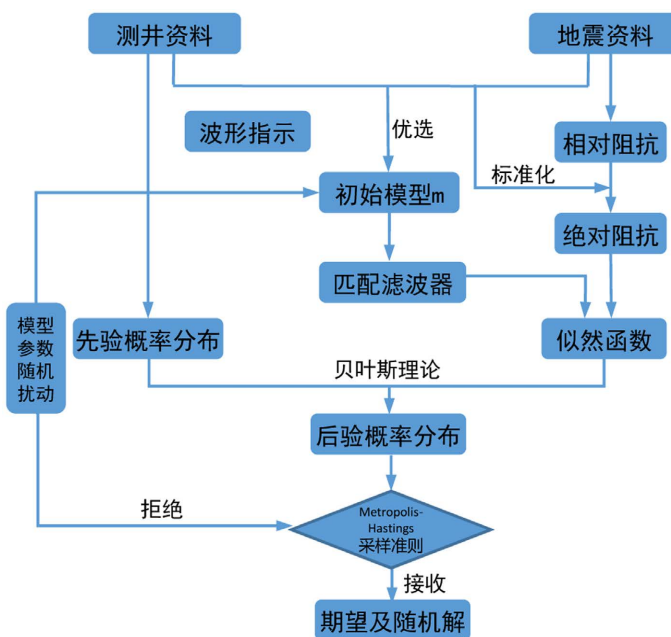


Figure 4. Flow chart of face-controlled waveform indication inversion
图 4. 相控波形指示反演流程图

4. 反演效果分析

本次研究的范围是选取桑塔木三维区的西部的 300 多平方公里, 地震资料品质相对较好, 这个区域内钻井总计 76 口井, 便于选取不同的井参与计算和验证工作。通过对砂层厚度统计发现, 3~7 米的薄层占了绝大多数(图 5)。并且多数井的部分井段存在大段泥岩垮塌, 波阻抗曲线对岩性区分能力较弱。通过对岩性敏感参数分析, 自然电位曲线在该区能够相对较好的区分岩性。因此对该区的薄储层预测工作, 是使用以自然电位为储层参数的波形指示反演方法。

由于各井的测井年代、仪器不同, 造成各井的相似砂体 SP 曲线值范围各不相同, 这种曲线量纲上的差别, 会对预测结果产生偏差。因此有必要对全区测井曲线进行 SP 基线校正及标准化、归一化处理工作。图 6 为校正井和标准井目的层段的 SP 值正态分布图, 通过校正后的曲线, 可以为反演工作提供一个良好输入。本次研究共选取 45 口井参与反演计算, 31 口井作为验证并不参与计算, 用来检验反演的效果。

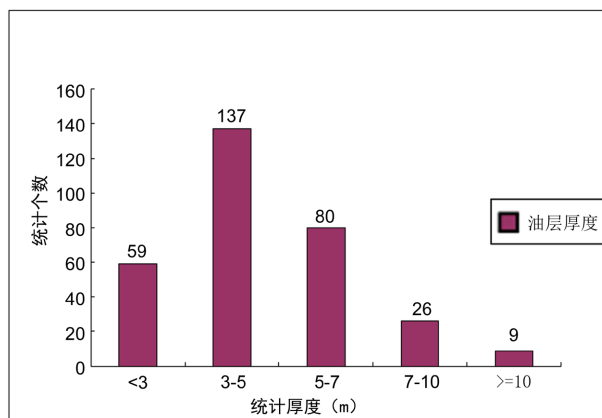


Figure 5. Statistical histogram of reservoir thickness

图 5. 油层厚度统计直方图

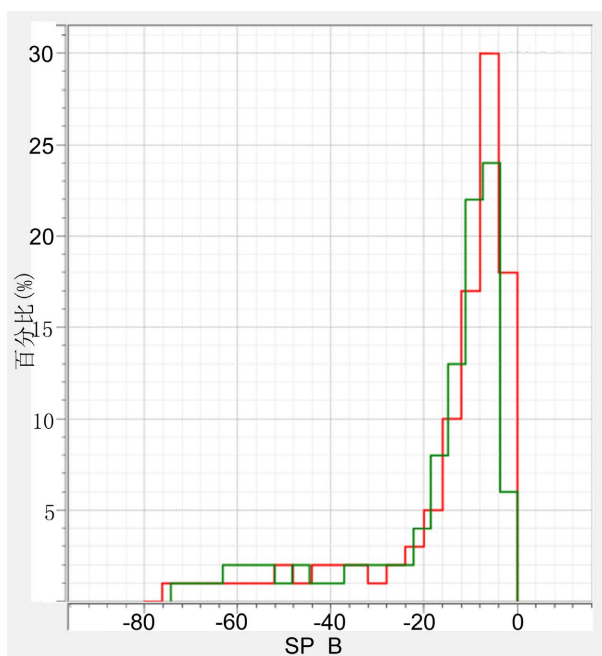


Figure 6. Natural potential curve correction chart

图 6. 自然电位曲线校正图版

在反演阶段,利用自然电位的高低来表征储层与非储层,将 45 口井的校正后自然电位曲线参与反演。图 7 是过 7 口井的相控反演剖面,其中 3 口黑色曲线是参与反演计算的井,4 口红色曲线是预留的验证井。从该图可以看出,本次反演结果与井上的岩性特征曲线对应关系好,纵向识别率得到极大提高,预测砂体横向变化自然,横向分布与地震同向轴的横向展布一致。从剖面上还可以看出参与井及验证井均有较高的吻合率,参与计算的井砂体识别率高,验证井砂体识别率整体也较高,只是有部分薄层未能很好识别。通过统计,该方法能够有效识别 3 米以上的薄储层。

由于该区顶部存在剥蚀现象,传统的时间切片已不能保证切片的等时性,因此在薄砂体的平面刻画中引入使用地震沉积学的关键技术之一地层切片技术。通过以前期精细解释的多个层位作为趋势约束,根据地层展布特征,生成了一系列虚切片,这些虚切片平行于约束层位的底面,与地层结构吻合,使用这些虚切片提取的属性可以保证单砂体刻画的等时性。图 8 为过两口探井的地震剖面,细蓝色线为建立

的高精度等时地层格架，为石炭系卡拉沙依组的平面分析奠定了基础。

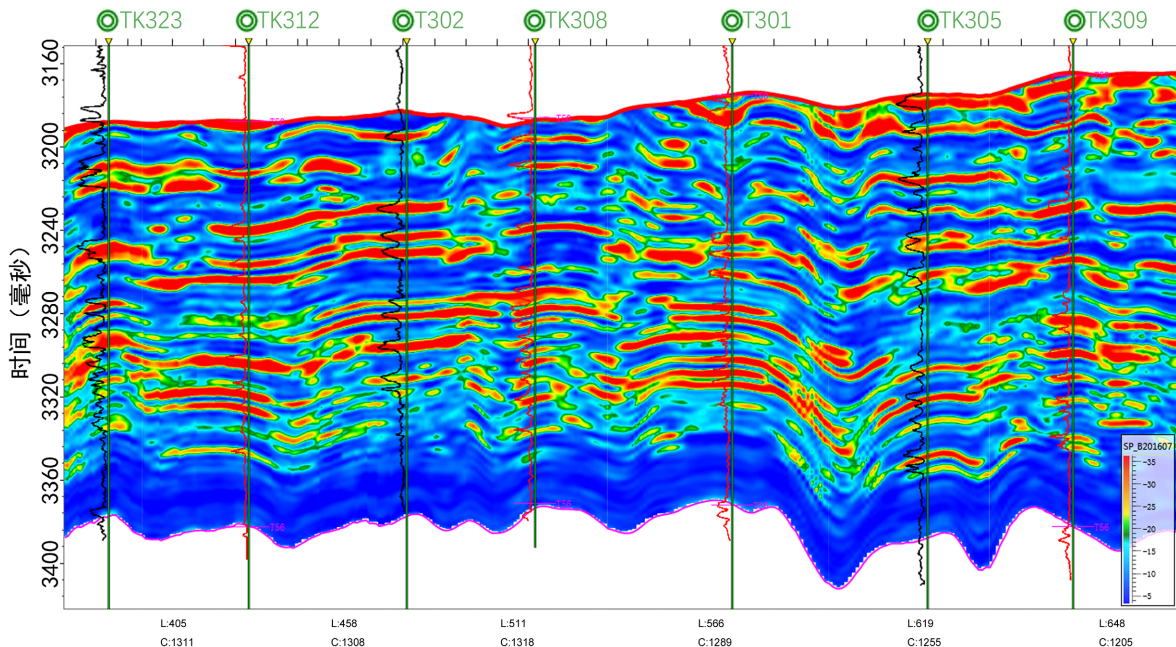


Figure 7. The cross well section of facies control inversion
图 7. 过井相控反演剖面图

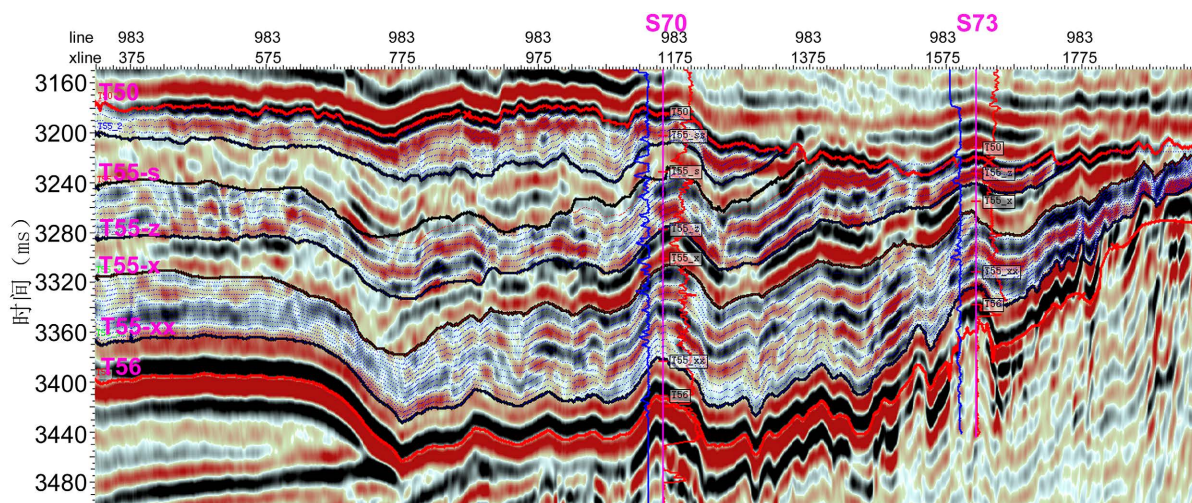


Figure 8. Well connected high precision stratigraphic framework section
图 8. 过井地层格架剖面

图 9 是对目的层中的一个砂层组提取的地层切片，从切片上可以看到鸟足状三角洲沉积样式，物源来自研究区北部，符合该区地质背景及认识。而且预测结果在各井点处，砂体厚度与已钻井吻合度高。地震波形指示反演的结果说明了该方法在研究区具有可行性。

5. 结论

1) 该反演方法基于相控思想，利用地震波形信息约束井参数进行高频模拟，实现地震波形特征与井曲线特征的耦合，更好地体现了相控反演的思想，反演结果随机性小、纵向分辨率高，能够用来预测横

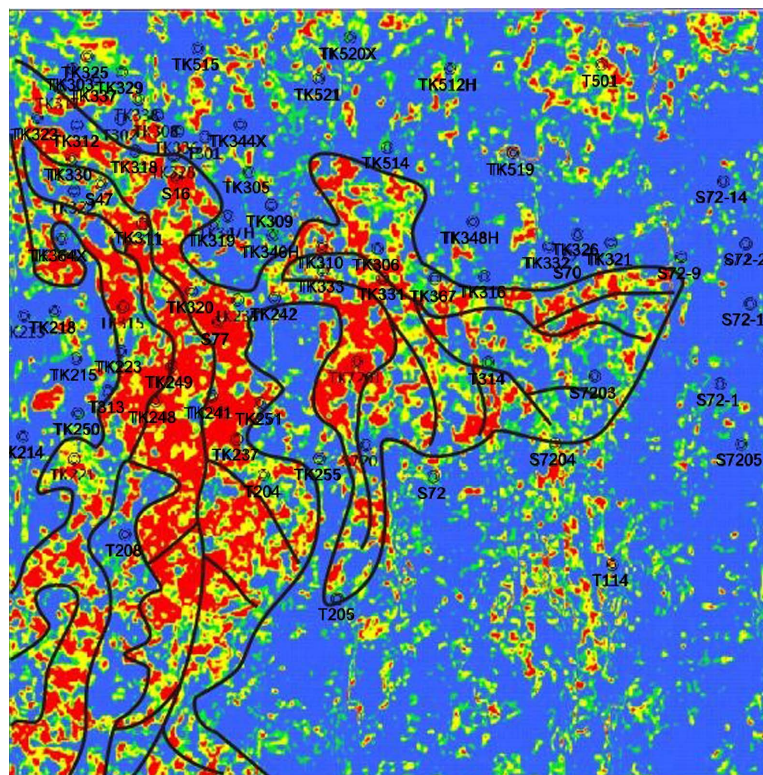


Figure 9. The stratigraphic slice of inversion
图 9. 反演平面图切片

向变化快的河道薄砂体。可以使用该反演方法对整个三维区进行薄砂体识别，为该区的勘探工作提供更多的决策依据。

2) 优选准确的岩性敏感区线，并进行必要的标准化归一化处理，也是沟通井震结合的重要步骤。使用井曲线的全频带信息，能提高反演的纵向分辨率，解决对研究区薄层砂体的识别及横向展布的预测。

3) 针对研究区这种薄互层发育的地质特征，要从平面刻画砂体，用来提取属性的切片等时性也是至关重要的。雕刻好薄层砂体的过程，实际也是综合应用并拓展地震沉积学的三项关键技术的过程。在实际实践中，应当在分析研究区地层特征的基础上，进一步开展分频精细解释，并在此基础上选取制作等时性的地层切片，是保障薄砂层各层平面刻画的必要技术手段。

参考文献

- [1] 盛述超, 毕建军, 李维振, 张明浩, 孙逊. 关于地震波形指示模拟反演(SMI)方法的研究[J]. 内蒙古石油化工, 2015(21): 147-151.
- [2] 曾洪流. 地震沉积学在中国: 回顾与展望[J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 419-426.
- [3] 曾洪流, 朱筱敏, 朱如凯, 张庆石. 陆相断陷型盆地地震沉积学研究规范[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(3): 275-284.
- [4] 朱筱敏, 董艳蕾, 曾洪流, 黄捍东, 刘强虎, 秦祎, 等. 沉积地质学发展新航程——地震沉积学[J]. 古地理学报, 21(2): 189-201.
- [5] 朱筱敏, 董艳蕾, 曾洪流, 林承焰, 张宪国. 中国地震沉积学研究现状和发展思考[J]. 古地理学报, 2020, 22(3): 397-410.
- [6] 孙思敏, 彭仕宓. 地质统计学反演及其在薄层砂体预测中的应用[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2007, 22(1): 42-48.

- [7] 刘喜武, 年静波, 吴海波. 几种地震波阻抗反演方法的比较分析与综合应用[J]. 世界地质, 2005, 24(3): 271-275.
- [8] 王西文, 石兰亭, 雍学善, 等. 地震波阻抗反演方法研究[J]. 岩性油气藏, 2007, 19(3): 81-88.
- [9] 董春梅, 张宪国, 林承焰. 有关地震沉积学若干问题的探讨[J]. 石油地球物理勘探, 2006, 41(4): 405-409.
- [10] 刘书会, 宋国奇, 杨培杰. 地震沉积学在陆相盆地中的应用: 东营三角洲勘探实例[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(2): 360-368+222-223.
- [11] 林承焰, 张宪国, 董春梅. 地震沉积学及其初步应用[J]. 石油学报, 2007, 28(2): 69-72.
- [12] 刘长利, 朱筱敏, 胡有山, 廖飞燕, 王正国. 地震沉积学在识别陆相湖泊浊积砂体中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(3): 657-664.
- [13] 孔省吾, 张云银, 沈正春, 张建芝, 魏红梅, 宋艳阁, 等. 波形指示反演在灰质发育区薄互层浊积岩预测中的应用——以牛庄洼陷沙三中亚段为例[J]. 物探与化探, 2020, 44(3): 665-671.