

# 基于地震波形特征全局寻优的非线性地震反演砂体预测技术研究及应用

张善义

大庆油田有限责任公司第五采油厂, 黑龙江 大庆

收稿日期: 2024年1月11日; 录用日期: 2024年3月11日; 发布日期: 2024年3月20日

## 摘要

针对窄小河道含油砂体预测难、垂向分辨率和平面分辨率不能兼得的问题, 形成了基于地震波形特征的全局寻优的非线性地震反演砂体预测技术, 该技术能够充分利用非线性地震反演提高了纵向分辨率高, 同时基于地震基于波形特征反演技术又提高了横向分辨率; 利用该地震反演技术河道砂体预测精度由过去的76.3%提高到83%, 取得了较好的效果, 该技术对窄小河道砂体的精细预测具有较好的指导意义。

## 关键词

非线性地震反演, 波形特征反演, 河道砂体, 储层预测

## Research and Application of Nonlinear Seismic Inversion Sand Body Prediction Technology Based on Global Optimization of Seismic Waveform Characteristics

Shanyi Zhang

Oil Recovery Plant No.5, Daqing Oilfield Co., Ltd., Daqing Heilongjiang

Received: Jan. 11<sup>th</sup>, 2024; accepted: Mar. 11<sup>th</sup>, 2024; published: Mar. 20<sup>th</sup>, 2024

## Abstract

In order to solve the problems of difficult prediction of oil-bearing sand bodies in narrow and small river channels, the non-linear seismic inversion sand body prediction technique based on

global optimization of seismic waveform characteristics is formed, this technique can make full use of the nonlinear seismic inversion to improve the vertical resolution, and also improve the horizontal resolution based on the seismic waveform feature inversion. By using this seismic inversion technique, the prediction accuracy of channel sand body has been improved from 76.3% to 83%, and good results have been achieved.

## Keywords

Nonlinear Seismic Inversion, Waveform Characteristics Inversion, Channel Sand Body, Reservoir Prediction

Copyright © 2024 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

地震反演技术是利用地震、测井等资料预测井间砂体发育状况的一项技术[1] [2] [3]。地震反演的分类从所利用的数据可分为叠前反演和叠后反演[4] [5] [6]；从反演模型参数来分主要有：储层特性反演、岩石物性反演、地质结构反演、各向异性参数反演、阻抗反演以及速度反演等[7]-[13]；从使用的数学方法可分为：最优化拟合反演、遗传算法反演、蒙特卡罗反演、Born 近似反演、统计随机反演，以及基于神经网络的反演等[14] [15] [16]。由于直接反演存在不适应性等问题，目前大部分反演方法都采用正反演最佳拟合的办法[17]，垂向和平面分辨率都没有办法兼顾。目前方法上以从声波波动方程，叠后的低通约束反演方法，发展到声波波动方程全波段的约束反演，也就是设法拓宽地震信息的高频成分，使之达到井中约束资料的频率范围[18]。目前反演方法所面临的主要问题是井向外推时的多解性问题[19]，且有的反演垂向分辨率高、有的平面分辨率高[20]，因此，如何既能提高垂向识别精度又能实现横向精度的提高，目前是面对的大难点。本文充分利用非线性地震反演提高了纵向分辨率高，同时基于地震基于波形特征反演技术又提高了横向分辨率；利用该融合反演技术对窄小河道砂体的精细预测具有较好的指导意义。

## 2. 基于波形特征的全局寻优的非线性地震反演技术原理

该技术充分利用非线性地震反演提高纵向分辨率高，同时地震基于波形特征反演技术又提高了横向分辨率，该技术对窄小河道砂体的精细预测具有较好的指导意义。

### 2.1. 全局寻优的非线性地震反演

全局寻优的非线性地震反演是采用模拟退火全局寻优的非线性反演方法，解决了地震反演所遇到的数据和模型之间高度非线性和目标函数具有多个极小值问题，充分利用高频信息，提高反演的精度和分辨率，使全局寻优的非线性地震反演纵向分辨率高，克服了其他反演方法模型化严重的问题，满足了窄小河道砂体的精细预测。

该反演方法是在数学上，一个定义在开区间  $(x_0 - r, x_0 + r)$  上的无穷可微的实变函数或复变函数  $f$  的泰勒级数是如下的幂级数[21]：

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!} (x - x_0)^n \quad (1)$$

泰勒公式是将一个在  $x = x_0$  处具有  $n$  阶导数的函数  $f(x)$  利用关于  $(x - x_0)$  的  $n$  次多项式来逼近函数的方法。

若函数  $f(x)$  在包含  $x_0$  的某个闭区间  $[a, b]$  上具有  $n$  阶导数, 且在开区间  $(a, b)$  上具有  $(n+1)$  阶导数, 则对闭区间  $[a, b]$  上任意一点  $x$ , 成立下式:

$$f(x) = \frac{f(x_0)}{0!} + \frac{f'(x_0)}{1!}(x-x_0) + \frac{f''(x_0)}{2!}(x-x_0)^2 + \cdots + \frac{f^{(n)}(x_0)}{n!}(x-x_0)^n + R_n(x) \quad (2)$$

式中:  $f^{(n)}(x_0)$  表示  $f(x_0)$  的  $n$  阶导数, 等号后的多项式称为函数  $f(x)$  在  $x_0$  处的泰勒展开式, 剩余的  $R_n(x)$  是泰勒公式的余项, 是  $(x-x_0)^n$  的高阶无穷小。

该方法准确架接地震和测井之间的桥梁; 实现多元地学信息在模型空间的有机融合, 提高反演的信息使用量; 充分利用高频信息, 提高反演的精度和分辨率; 有效提取反演结果所蕴藏的储层信息, 对薄储层纵向分辨率较高, 但是该方法横向分辨率相对较低。

## 2.2. 地震波形特征反演

地震波形特征反演是地震波形驱动的结构化统计表征的一种方法, 利用波形横向变化表征储层空间结构的变异性。

首先根据地震波形相似性对样本井分类, 对同类样本井进行多尺度分析, 在地震频带外提取确定性结构成分, 作为波形相控模拟结果, 使高频部分从完全随机到逐步确定。

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (3)$$

式中,  $Z(x_0)$  为未知点的值,  $Z(x_i)$  为波形优选的已知样本点的值,  $\lambda_i$  为第  $i$  个已知样本点对未知样点的权重,  $n$  为优选样本点的个数。

地震波形指示反演横向分辨率高, 具有精度高、反演结果随机性小的特点, 使反演结果从完全随机走向了逐步确定, 并且适合于不均匀井位分布, 对薄储层横向分辨率较高, 但是该方法纵向分辨率相对较低。

## 2.3. 基于波形特征的全局寻优的非线性地震反演

基于全局寻优与波形反演融合的样本[22], 在空间上具有较好的相关性, 可以利用全局寻优搜索方法得到的最优解和马尔科夫链蒙特卡洛随机模拟进行无偏、最优估计, 获得期望和随机解进行融合。

$$Q(x_0) = \sum_{i=1}^n [a_i Z_1(x_i) + \beta_i Z_2(x_i)] \quad (4)$$

式中,  $Z(x_0)$  为未知点的值,  $Z_1(x_i)$  为波形优选的已知样本点的值,  $a_i$  为第  $i$  个已知波形优选样本点对未知样点的权重,  $n$  为优选样本点的个数;  $Z_2(x_i)$  为全局寻优的已知样本点的值,  $\beta_i$  为第  $i$  个已知全局寻优样本点对未知样点的权重,  $n$  为优选样本点的个数。

基于全局寻优的非线性地震反演技术, 优点是纵向分辨率高, 能够反映研究区薄储层发育的地质特征, 且断面清楚(图 1); 基于地震波形特征反演技术优点是反演结果横向分辨率(图 2)。两者有机结合, 可以更好地刻画河道砂纵横向变化(图 3)。

通过技术优势互补很好地刻画河道砂纵横向变化, 通过验证井对比, 厚度大于 1 m 的河道砂体可以预测出来, 但是小于 1 m 砂体, 没识别出来。例如: 5G42-30 井 F131 层有效厚度 0.8 m 没有识别出来; 5G31-30 井 F111 层有效厚度 0.4 m 没有识别出来; 5G15 井 F151 层有效厚度 0.8 m 没有识别出来(图 4)。

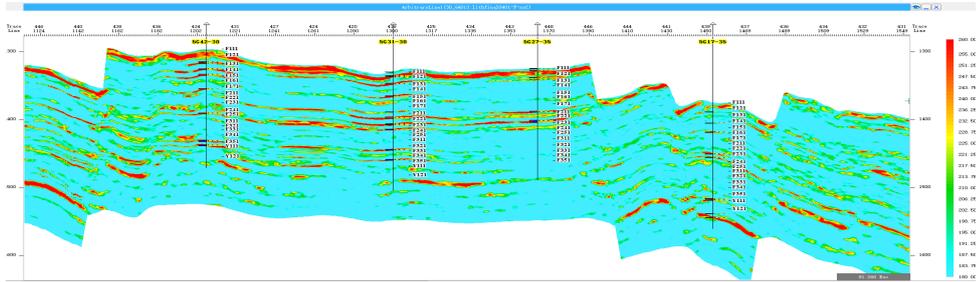


Figure 1. Nonlinear seismic inversion with global optimization  
图 1. 全局寻优的非线性地震反演

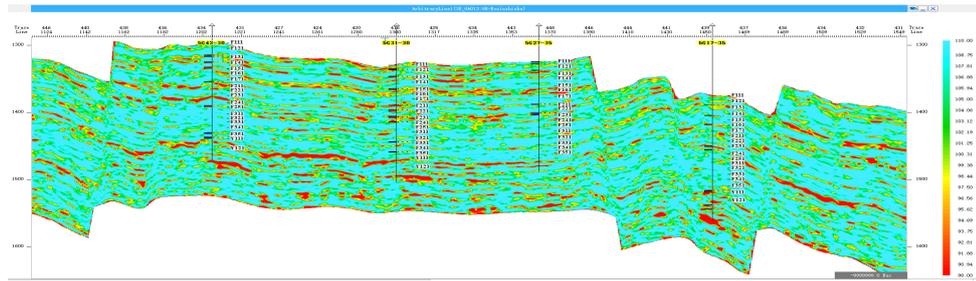


Figure 2. Inversion of seismic waveform characteristics  
图 2. 地震波形特征反演

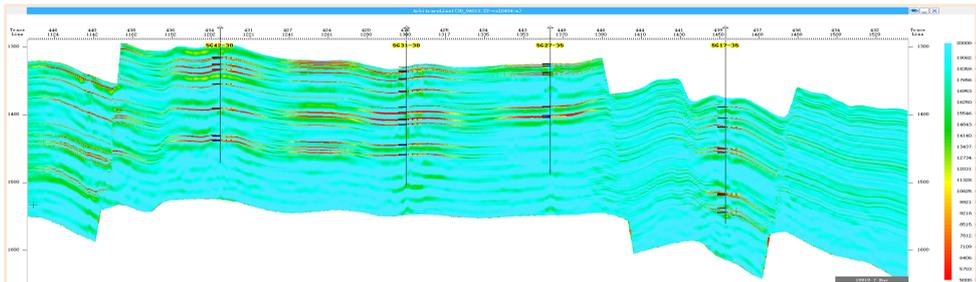


Figure 3. Nonlinear seismic inversion based on waveform features for global optimization  
图 3. 基于波形特征的全局寻优的非线性地震反演

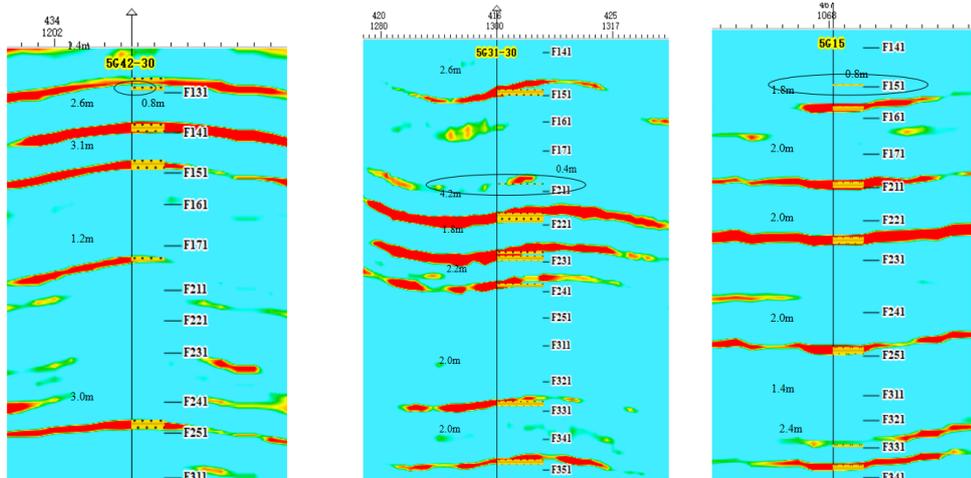


Figure 4. Analysis of the accuracy of post well inversion  
图 4. 后验井反演精度分析

### 3. 研究区应用

研究区位于松辽盆地中央坳陷大庆长垣, 研究区储层厚度较薄, 储层发育差, 主要发育窄小河道砂体, 单层砂岩厚度在 0.6~7.6 m, 平均 2.0 m, 以小于 3 m 为主, 层数钻遇率达 86.7%, 累计厚度占总厚度的 70.7%。单层有效厚度在 0.4~6.0 m, 平均 1.7 m, 以小于 3 m 为主, 层数钻遇率达 92.1%, 累计厚度占总厚度的 79.7%。为了更好的刻画研究区的窄小河道砂体, 应用基于波形特征的全局寻优的非线性地震反演实现了研究区窄小河道砂体的精细刻画。

#### 3.1. 层位调整及框架模型建立

层位标定的目的是建立时深转换关系。利用这个时深关系, 可以把深度域的地质数据和测井数据转换到时间域, 或把时间域的地震数据转换到深度域。只有把各种数据放到同一坐标系统下, 才能够实现各种数据的对比及应用。时深关系的建立通常采用合成地震记录标定的方式获得。

地震剖面可以看作是子波与反射系数的褶积[23]。用公式表述为:

$$s(t) = w(t) \times r(t) \quad (5)$$

其中:  $s(t)$  是地震记录;  $w(t)$  为震源子波;  $r(t)$  为反射系数系列。为了合作地震记录, 首先需要知道剖面的反射系数曲线  $r(t)$ , 为了得到  $r(t)$ , 就要有各薄层的速度资料和密度资料, 以便得出波阻抗曲线, 最后计算反射系数曲线。

速度资料可以通过连续速度测井获得。在有些地区, 没有连续速度测井资料。这时, 如果有电阻率测井曲线, 可以把电阻率测井曲线变换为速度曲线, 进而得到波阻抗曲线和反射系数曲线。根据研究和经验知道, 岩层的速度与岩层电阻率一样, 都是随岩层孔隙度增加而变小, 二者之间的关系可以用法斯特公式表示:

$$V = K(HR)^{\frac{1}{6}} \quad (6)$$

式中  $V$  是速度;  $H$  是深度;  $R$  是电阻率;  $K$  是一个与岩石性质有关的常数。这个公式的应用范围为深度大于 200 米, 自然电位曲线上没有特殊的峰值, 并且地层水的矿化度变化很小的地层(一般指砂泥岩地层)。

现在的密度测井种类繁多, 通常都会提供密度测井数据。在没有密度测井数据的地区, 可以使用 Gardner 公式计算密度曲线[24]:

$$den = aV^c \quad (7)$$

式中  $den$  是密度;  $V$  是速度;  $a$  和  $c$  是系数, 可以通过拟合得到。

即使使用常量的密度来计算反射系数, 所产生的误差可以忽略。因为波阻抗的变化主要取决于速度的变化。

#### 3.2. 子波提取

地震子波的选择是合成地震记录制作过程中非常重要的工作, 地震子波选择是否合适直接影响到合成地震记录的质量。通常有二种方法获得子波。

一是根据已总结出的地震子波的特点, 用一些具有特殊数学表达式的波形来表示, 即理论子波, 如雷克子波、正弦子波等。二是利用实际观测到的地震记录, 用数字处理方法在一定的假设条件下, 求取地震子波, 即子波反演。

本次从地震数据统计子波振幅谱, 利用最小平方法, 从合成记录和井旁道中提取子波相位, 二者相加得到最终子波。

### 3.3. 地震反演砂体预测

利用基于波形特征的全局寻优的非线性地震反演,从砂岩预测图可以看出,研究区FI21层砂岩发育区呈北西向片状展布,平面分布连续性较好,研究区南部砂岩较发育。从砂岩等值图上看,砂岩分布与沉积相分布具有很好的一致性。砂岩厚度高值区(>10 m)成北西向片状展布,砂岩厚度在5~10 m之间,平均14 m;有效厚度一般在1~5 m之间,平均2.4 m(图5)。

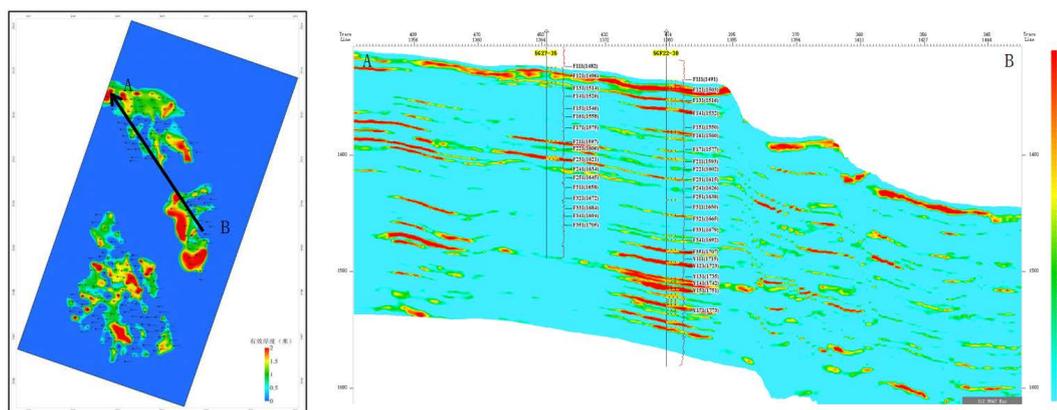


Figure 5. Seismic inversion plan and profile map

图5. 地震反演平面和剖面图

利用均匀选取27口作为后验井,应用基于波形特征的全局寻优的非线性地震反演预测的河道砂体预测符合率为87.1%。取得较好的效果(图6)。

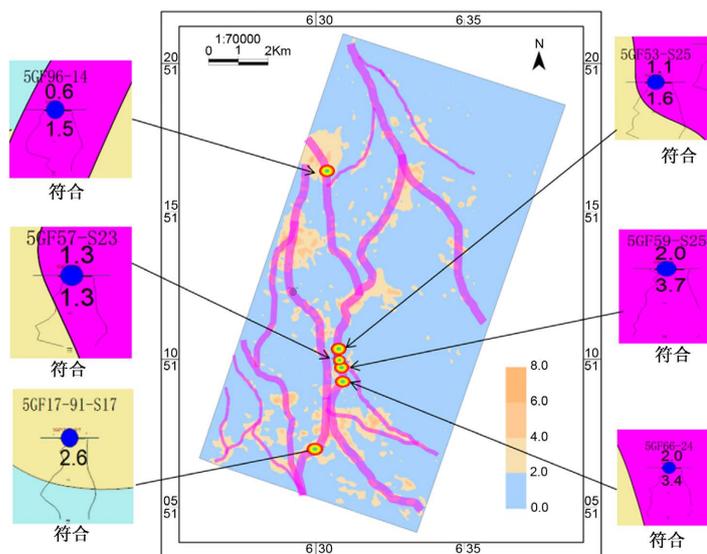


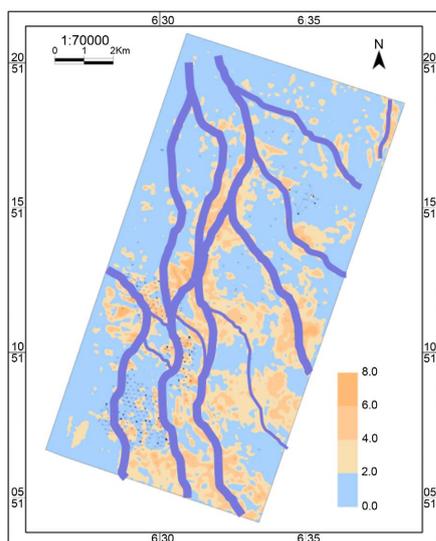
Figure 6. Analysis of the prediction accuracy of Jingzhen river sand body

图6. 井震河道砂体预测精度分析

### 3.4. 井震结合沉积微相描述

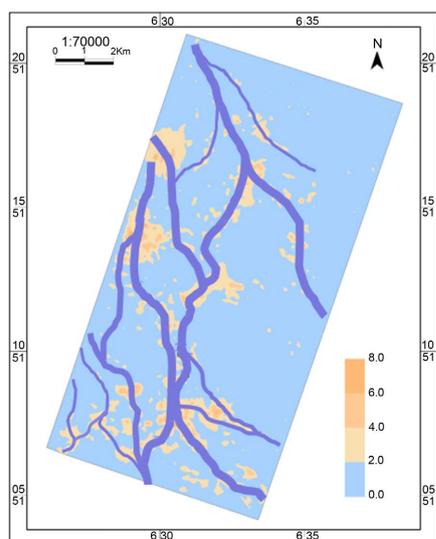
FI1河道规模较小,平面上河道呈窄枝状,多具分流河道特征。底界面附近河道呈孤立的单一河道形态,厚度约4~5 m,最大厚度可达6 m,横向展布范围较小,底界面可全区对比。溢岸决口沉积较少发育,

厚度约 4~5 m，旋回中部河道主要呈孤立状，厚度约 4 m，薄层砂岩发育面积较大，横向厚度变化较小。全区范围内，研究区中部河道规模较小，主要为分散孤立的单一河道沉积，垂向与薄层席状砂岩和湖相泥岩接触，少数井可见反旋回河口坝发育，厚度约 4 m。旋回内以薄层孤立河道砂岩夹薄层大规模席状砂岩为特征，河道砂岩呈分散分布状态(图 7)。



**Figure 7.** FI1 well seismic combined with river channel distribution map  
**图 7.** FI1 层井震结合河道分布图

FI2 河道发育程度较低，发育网状河，河道砂体厚度一般为 4~5 m。底界面附近河道极少呈叠置形态，厚度约 6~8 m，最大厚度可达 10 m，横向展布范围较小，底界面可全区对比。溢岸决口沉积发育，厚度约 5~7 m，旋回中部河道主要呈孤立状，厚度约 5 m。全区范围内，叠置型河道发育较少，主要集中于西南地区，研究区中部河道规模逐渐减小，主要为分散孤立的单一河道沉积，垂向与决口溢岸沉积相接触，主要发育于东北地区(图 8)。



**Figure 8.** FI2 well seismic combined with river channel distribution map  
**图 8.** FI2 层井震结合河道分布图

## 4. 结论

形成了基于波形特征的全局寻优的非线性地震反演砂体预测技术, 该技术能够充分利用非线性地震反演提高了纵向分辨率高, 同时基于地震基于波形特征反演技术又提高了横向分辨率。

利用基于波形特征的全局寻优的非线性地震反演砂体预测技术河道砂体预测精度由过去的 76.3% 提高到 83%, 取得了较好的效果, 该技术对窄小河道砂体的精细预测具有较好的指导意义。

## 参考文献

- [1] 刘振峰. 油气地震地质模型述评[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(1): 19-29.
- [2] 洪余刚, 赵华, 梁波, 等. 利用地震属性聚类分析技术预测辽河油田有利油气聚集带[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2007, 22(4): 35-40.
- [3] 卫平生, 潘建国, 张虎权, 等. 地震储层学的概念、研究方法和关键技术[J]. 岩性油气藏, 2010, 22(2): 1-6.
- [4] 曾洪流, 朱筱敏, 朱如凯, 等. 陆相拗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.
- [5] 曾洪流. 地震沉积学在中国: 回顾和展望[J]. 沉积学报, 2011, 29(3): 417-425.
- [6] 李婷婷, 王钊, 马世忠, 等. 地震属性融合方法综述[J]. 地球物理学进展, 2015(1): 378-385.
- [7] 林承焰, 张宪国. 石油地震地质学探讨及展望[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(1): 17-21.
- [8] 刘爱群, 陈殿远, 任科英. 分频与波形聚类分析技术在莺歌海盆地中深层气田区的应用[J]. 地球物理学进展, 2018, 28(3): 338-344.
- [9] 齐桓, 王海, 董冬, 等. 地震沉积学在薄储层预测中的应用——以 L87 井区水下扇体识别为例[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(2): 709-713.
- [10] 张娟. 基于多元线性回归分析的薄储层预测技术在胜利探区的研究与应用[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(1): 91-94.
- [11] 陈可洋, 杨微, 陈树民, 等. 逆时成像技术在大庆探区复杂构造成像中的应用[J]. 岩性油气藏, 2017, 29(6): 91-100.
- [12] 刘兴冬. 岩性油藏薄窄砂体地震精细处理解释技术[J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36(4): 137-141.
- [13] 王保丽, 孙瑛莹, 印兴耀, 等. 基于 Metropolis 抽样的非线性反演方法[J]. 石油地球物理勘, 2015, 50(1): 111-117.
- [14] 李东安, 宁俊瑞, 刘振峰. 用神经网络和地质统计学综合多元信息进行储层预测石油与天然气地质[J], 2010, 31(4): 493-498.
- [15] 丁峰, 年永吉, 王治国, 等. 地震多属性 RGBA 颜色融合技术的应用研究[J]. 石油物探, 2010(3): 248-252.
- [16] 李艳芳, 程建远, 朱书阶, 等. 2009 基于 RGB 渲染技术的地震多属性分析技术[J]. 煤炭学报, 2009, 34(11): 1512-1516.
- [17] 李占东, 张丽双, 李阳, 等. 基于多次迭代属性融合技术的河道砂刻画——以大庆油田扶余油层 Z 区为例[J]. 地球物理学进展, 2017, 32(3): 1161-1168.
- [18] 陈俊, 程金星. 基于 RGB-IHS 变换的地震属性融合方法[J]. 石油天然气学报, 2014(11): 69-73.
- [19] 刘立峰, 孙赞东, 韩剑发, 等. 量子粒子群模糊神经网络碳酸盐岩流体识别方法研究[J]. 地球物理学报, 2014, 57(3): 991-1000.
- [20] 潘光超, 周家雄, 韩光明, 等. 中深层“甜点”储层地震预测力法探讨——以珠江口盆地西部文昌 A 凹陷为例[J]. 岩性油气藏, 2016, 28(1): 94-100.
- [21] 王捷. 拉格朗日定理对泰勒公式的证明[J]. 大同职业技术学院学报, 2002, 16(1): 76-177.
- [22] 于正军. 地震属性融合技术及其在储层描述中的应用[J]. 特种油气藏, 2013, 20(6): 6-9.
- [23] 朱筱敏, 赵东娜, 曾洪流, 等. 松辽盆地齐家地区青山口组浅水三角洲沉积特征及其地震沉积学响应[J]. 沉积学报, 2013, 31(5): 889-897.
- [24] 吴海波, 王江, 李军辉. 地震多属性融合技术在贝尔凹陷储层预测中的应用[J]. 岩性油气藏, 2014, 26(2): 96-101.