

拓频、云变换等多种技术在二连探区 W 区块 储层预测中的组合应用

刘雷颂¹, 张浩¹, 邢雅文², 郭增虎¹, 赵懿², 王亚楠¹, 李梁¹

(1. 中国石油东方地球物理公司研究院地质研究中心, 涿州 072751;

2. 中国石油集团华北油田分公司勘探部, 任丘 062550)

摘要: 二连盆地为陆相小湖盆, 相带横向变化快, 少则 2 km~3 km, 扇体类型多样, 构造复杂, 现有地震资料分辨率低。通过分析, 波阻抗曲线大致可以区分砂、泥岩, 但对优质储层不敏感, 电阻率与密度曲线对优质储层相对敏感。笔者基于数据分析制定优质储层预测流程, 首先对地震数据进行拓频处理; 其次进行断层建模、二维相控地质统计反演; 再次通过云变换预测密度与电阻率数据体; 最终通过优质储层解释模板, 进行交会解释, 预测优质储层展布。预测结果达到了预期。

关键词: 拓频; 交会; 相控反演; 云变换

中图分类号: P618.13

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.05.04

0 引言

二连盆地为陆相小湖盆, 相带横向变化快, 少则 2 km~3 km, 扇体类型多样, 钻遇岩性 40 余种, 后期经过多次构造运动, 断裂复杂。前人主要利用振幅信息及稀疏脉冲反演进行储层预测, 已钻井失利分析数据表明, 储层预测不准导致失利占比 60%。为了解决储层预测精度问题, 综合多方面因素, 选取了二连探区 W 区块进行了储层预测攻关。该区块目的层岩性为碎屑岩, 储层为砂砾岩类型。现有的文献中砂砾岩储层预测方法有: 王跃刚等^[1]利用沉积相结合地震属性预测储层、孙海宁等^[2]利用地震反演预测储层、王静等^[3]利用地震属性结合地震反演预测储层等大致三类方法。这些方法在二连探区都进行过应用, 效果不是很理想, 基于此, 需要突破现有方法, 改进思路进行储层预测攻关。

1 数据分析

储层预测精度受制于地质认识、地震资料分辨率及钻、测井资料的敏感性、勘探程度等几方面因素。波阻抗反演是储层预测的常用技术。波阻抗反演中两个关键数据源于地震和测井。

首先是地震资料分辨率的问题, 这也是从采集到处理一直需要攻关的问题。通过对研究区内地震资料频谱分析, 图 1(b)为图 1(a)中蓝色框中的频谱显示, 该区地震数据目的层段有效带宽 5 Hz~60 Hz, 主频为 24 Hz, 根据 $1/4\lambda$ 公式可知地震纵向识别能力为大于 25 m。通过对研究区内钻井目的层钻遇砂岩厚度统计, 单砂层厚度为 1 m~10 m, 平均厚度 8 m, 主要集中在 1 m~10 m, 图 2 为单层砂岩厚度统计直方图。

其次是测井曲线对岩性及储层敏感性的问题, 测井曲线的敏感性决定了储层预测的精度。该区目

的层岩性主要为泥岩、砂砾岩；储层主要为油层和干层，因此泥岩、油层、干层可以作为测井曲线敏感性分析的指示色标。图3为该井目的层段综合图。图中可视AC与GR对应关系较好，区分泥岩

和砂岩效果最好，进一步针对AC与GR进行直方图分析(图4(a)为AC直方图，图4(b)为GR直方图)，AC小于236为砂砾岩，大于236为泥岩；GR大于160为泥岩，小于160为砂砾岩。

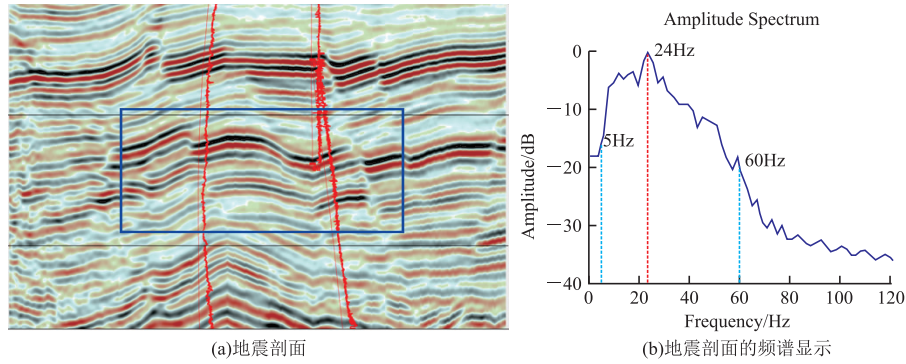


图1 目的层频谱分析
Fig.1 Spectrum analysis of target layer

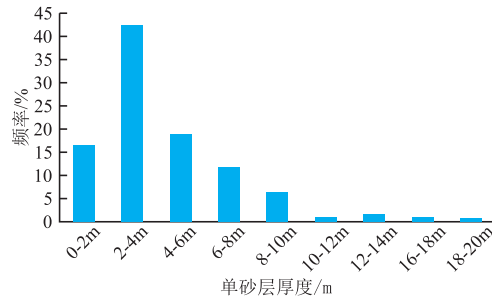


图2 单砂层厚度统计直方图
Fig.2 Statistical histogram of single sand layer thickness

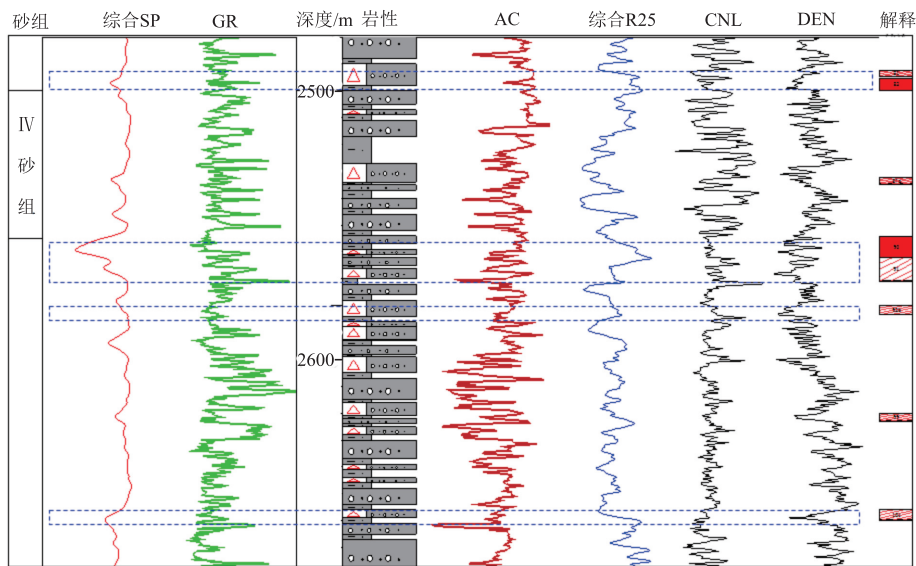


图3 钻井目的层综合图
Fig.3 Comprehensive map of drilling target layer

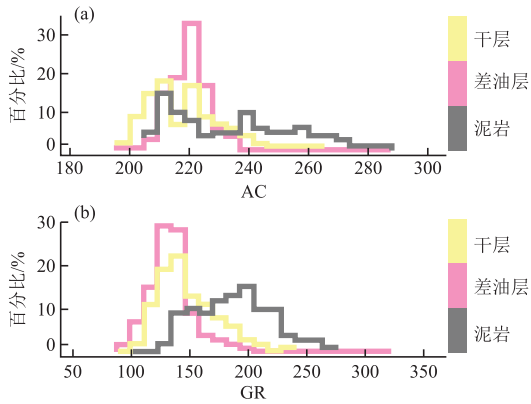


图 4 AC 与 GR 直方图

Fig. 4 Histograms of AC and GR

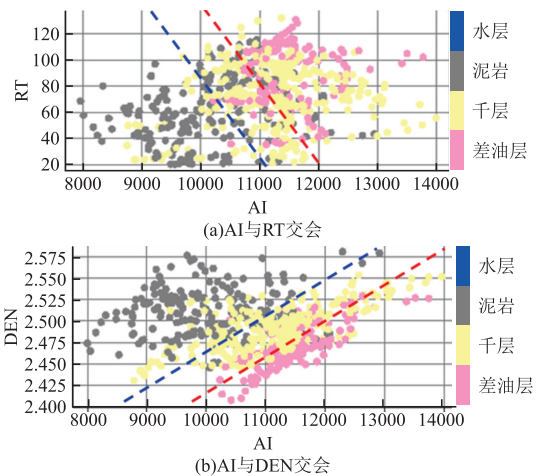
通过测井解释统计该区目的层段油层及干层测井数值如下:

表 1 中测井曲线数值分析表明,AC 与 CNL 针对油层、干层没有敏感性,而 RT 与密度曲线有如下规律,即油层段为相对高 RT、低 DEN,干层段为相对低 RT、高 DEN。变换 AC 为 AI 进行 AI 与 RT 及 AI 与 DEN 进行交会分析(图 5)。

表 1 储层段测井曲线数值统计表

Tab. 1 Logging curve numerical statistics of reservoir section

储层类型	AC/(us/m)	RT/(ohm·m)	CNL	DEN/(g/cm ³)
油层	198.3~218	72.7~177.6	5.8~10.4	2.41~2.53
干层	181~228.1	26.8~129.8	4.4~10.3	2.47~2.61



图中蓝色虚线基本为砂、泥岩界线;红色虚线基本为油层与干层的界线

图 5 AI 与 RT 及 DEN 交会

Fig. 5 Crossplots of AI with RT and DEN

图 5 中 AI 与 RT 及 DEN 两两交会大体能区分泥岩、干层及油层,进一步对 DEN 及 RT 进行交会分析(图 6),从图 6 中的两条十字相交蓝色虚线可以看出,左上角区域基本上为油层散点区域,右上角区域主要为干层散点区域,右下角主要为泥岩散点区域。

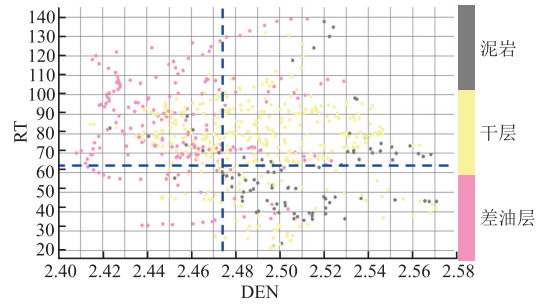


图 6 DEN 与 RT 交会

Fig. 6 Crossplots of DEN with RT

通过对测井曲线数值统计、直方图及交会等多种敏感分析表明,该区单一曲线难以解释有利储层,需多条曲线综合解释(交会解释)有利储层。

基于以上分析明确了研究区主要有两个难点:一是地震分辨率低,二是波阻抗曲线难以区分储层与非储层。针对以上两个难点主要采取如下措施:①针对地震分辨率低采取拓频办法;②针对波阻抗曲线难以区分储层与非储层的问题,采取相控反演加云变换属性预测及交会解释的方法。

具体储层预测流程如下(图 7):

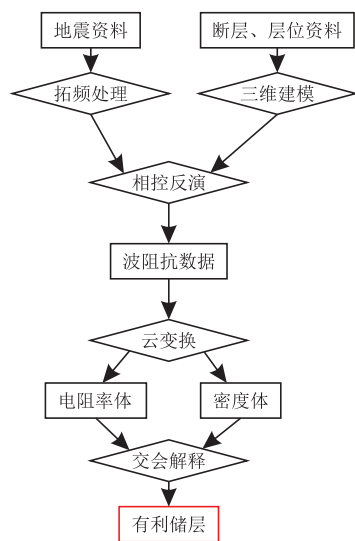


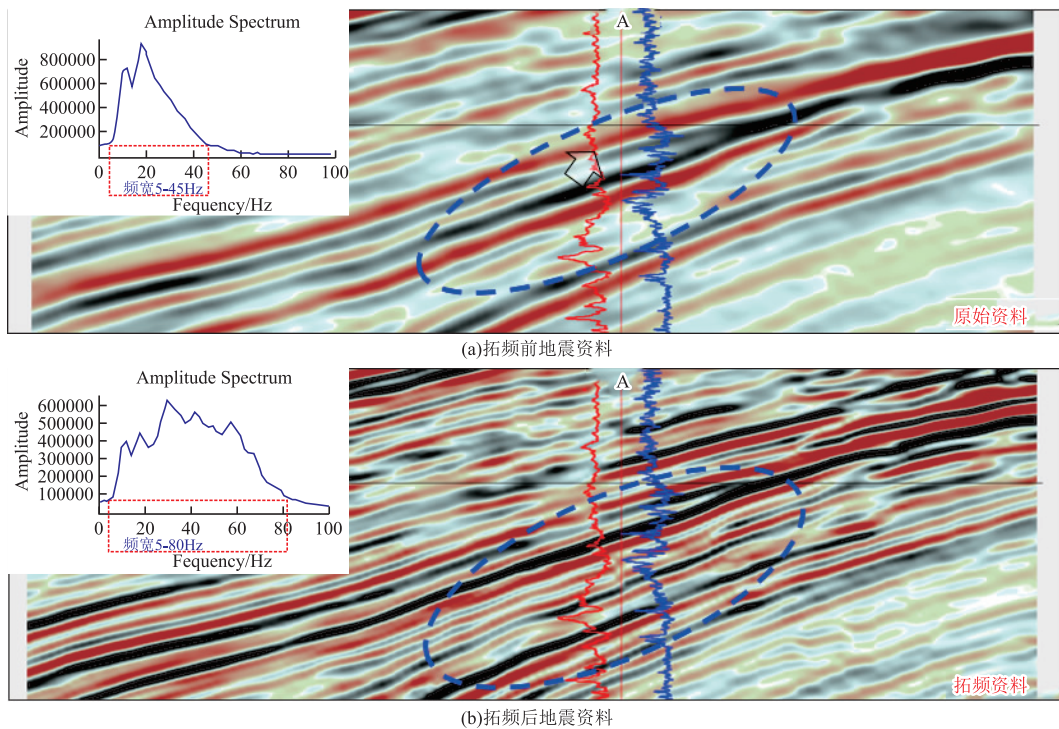
图 7 有利储层预测流程图

Fig. 7 Flow chart of predicted favorable reservoir

2 地震资料拓频处理

地震资料拓频技术分叠前、叠后技术,该区收集到的资料是叠后资料,因此只能在叠后地震资料的基础上进行拓频。叠后地震资料拓频技术有测井约束地震拓频技术^[3]、ButHRS 地震双向拓频技术^[4]、混合相位子波拓频技术^[5]、最小二乘拓频技术^[6]、谱蓝化拓频技术^[7]、谱能量增强法拓频技术^[8]、HFE 拓频技术^[9]等,根据地震资料情况,该区采用 TFE 拓频方法,基本原理为利用连续小波进行时频变换,对优势频带数据进行窄带滤波,计算振幅包络,取逆作为补偿因子,两侧计算信噪比进行频段外推,然后对频谱进行 \cos 算子分频,计算衰减系数,空间对比模型道高频差异,进行空间补偿。处理流程如图 8 所示。

图 9 为过研究区内 A 井的一条地震剖面,图 9(a)为原始地震资料,图 9(b)为拓频后地震资料。通过对地震资料拓频前后对比:处理前有效频宽为 5 Hz~45 Hz,处理后有效频宽为 5 Hz~80 Hz,处理后分辨率明显提高,处理后地震波形及振幅与测井曲线吻合更好,说明拓频部分为地质真实反映。



剖面中相应的左上角为各自对应的频谱;剖面中所投红色测井曲线为自然电位曲线;蓝色测井曲线为电阻率曲线

图 9 拓频前后地震资料对比

Fig. 9 Comparison of seismic data before and after frequency extension

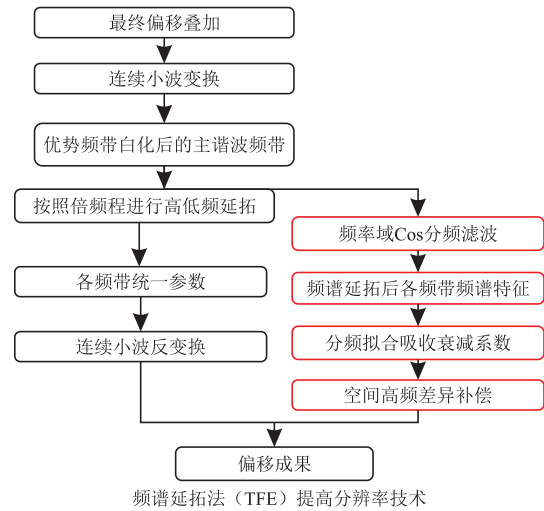


图 8 TFE 拓频技术流程

Fig. 8 The process of TFE frequency extension technology

3 断层建模

一般在做储层预测(波阻抗反演)的时候不考虑断层建模,只是简单的用层位建立一个格架模型,这在断裂不复杂或者无断层的情况下是可行的,在断裂复杂的情况下,断层附近如果只是简单的用层位

控制一下,那么断层附近储层预测会与实际情况不符。断层建模^[10-12]首先是对解释层位及断层进行整理编辑,其次是理清断层的交割关系,然后是断层与层位的切割关系(图 10(a),图 10(b))。

通过断层建模产生格架模型,然后进行测井曲线克里金插值,形成低频模型,为波阻抗反演准备基础参数。图 11(a)为断层建模控制下的波阻抗低频模型,图 11(b)为简单层位约束下的波阻抗低频模型,在断层附近加不加断层建模具有明显区别,之后的波阻抗反演及储层预测都会有较大差异。在断层建模控制下储层预测精度会有明显提高。

4 相控反演

相控反演^[13-14]有多种方法,综合各种因素分析,

小层段二维相控反演在该区比较实用。相控反演中关键步骤是二维相控数据如何求取,相控的数据参考的资料越多就会越接近真实的地质情况。从地质、地震及钻井资料出发综合分析储层分布概况,首先通过古地貌恢复,分析古沉积环境,了解源汇关系,推断物源方向,初步判断储层分布;其次通过单井划相、连井对比,结合古地貌划分沉积相,通过沉积分析有利储层分布范围;第三提取相应层段地震属性,一般振幅、频率属性与粒度、沉积有关,通过提取多种地震属性与钻井钻遇岩性进行关联,优选一种或几种反映储层发育的地震属性,然后进行属性融合。通过以上工作得到三张目的层段图件(图 12(a),图 12(b),图 12(c))。针对不同图件,根据分析的储层发育规律,有储层到非储层刻度为 1~100。综合以上分析,古地貌大致判断物源及沉积物颗粒粗细等,沉积相是通过

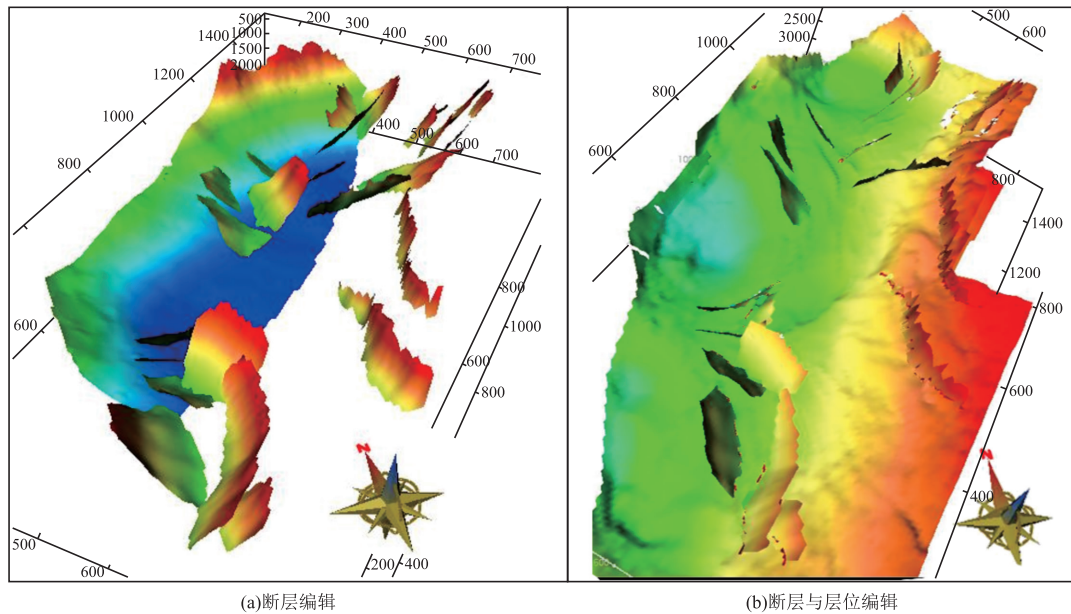


图 10 断层建模
Fig. 10 Fault modeling

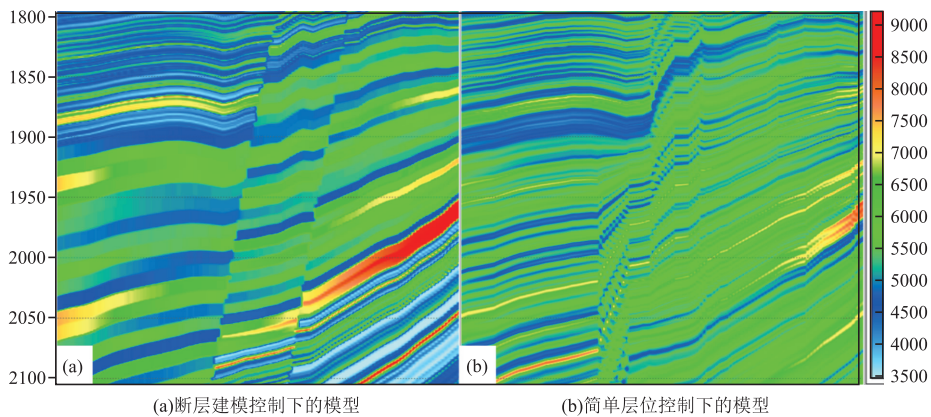


图 11 低频模型
Fig. 11 Low frequency model

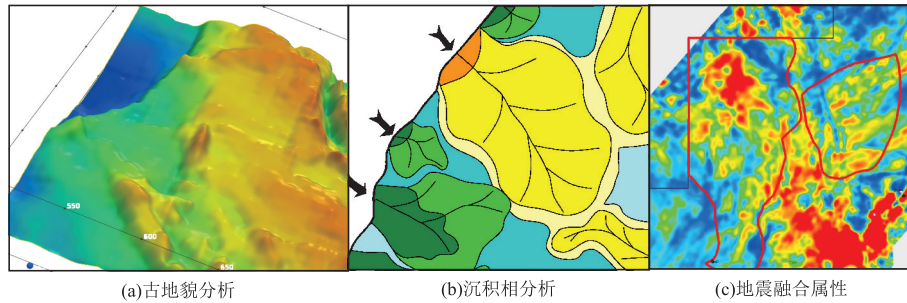


图 12 参与相控因素

Fig. 12 Inversion control factors

振幅属性表示阻抗高低,频率属性代表地层的薄厚,相位属性代表地层横向连续性,地震属性又有多解性,因此古地貌、沉积相、地震属性中单一因素对储层预测约束力较弱,综合三种因素对储层预测约束力会较高,基于以上分析,认为可靠度由高到低依次为:地震属性、沉积相、古地貌。

根据可靠度分析,设定古地貌权重为 1,沉积相权重为 2,地震属性权重为 3,根据不同权重归一处理,最终处理得到二维相控平面数据(图 13)。

在断层建模、二维相控等约束下进行地质统计反演(图 14)。

相控反演中的横向控制在平面相控的约束下进行变差函数设定,变差函数的参数主要参考相控数据设定。变差函数有 x、y 和 z 三个参数,z 参数的设定主要控制纵向分辨率,z 的设定要根据钻井钻遇砂岩厚度统计数据而定,尽量匹配小层厚度。

图 15 为地震数据拓频前后反演结果过 B、C 两井的剖面。对比分析,时频域重构提频处理后反演结果,可以识别 5 m~10 m 砂体,且与井吻合度高。图 16 为以前的反演剖面,与相控反演相比分辨率明显偏低,与井吻合度同样偏低,对比表明攻关效果明显。

5 云变换属性预测

云变换^[15]是通过测井波阻抗数据与其他测井数据建立云模型,基于云模型的连续数据离散化,建立非线性随机模拟数据,通过概率场模拟将一个变量转换为另一个变量。云模型是在模糊数学和概率统计基础上推导出来的一种定量互换模型,综合考虑了模糊性和随机性以及二者之间的关联性。

前面数据分析中,明确了该区电阻率和密度对优势储层敏感,因此在拓频地震数据反演结果的基础上进行云变换模拟电阻率及密度体。通过对波阻抗、密度及电阻率曲线进行概率统计,根据直方图建立相应的概率函数,通过不同坐标轴在同一维度建立云模型(图 18 为通过交会数据建立的云模型),即通过测井数据交会,在数据对集中的部位进行模型拟合建立与数据对对应的云模型,云模型函数 $C(E_{x_i}, E_{n_i}, H_{e_i})$ 。在云模型的指示下通过空间变差,模拟同一维度电阻率及密度数据(图 19 为通过云模型进行云变换得到的密度数据体及电阻率数据体剖面)。云变换公式如下:

$$f(X) \rightarrow \sum_{i=1}^n a_i \times C(E_{x_i}, E_{n_i}, H_{e_i}) \quad (1)$$

式中, C 为云模型, a_i 为幅度系数, E_{x_i} 为云模型函

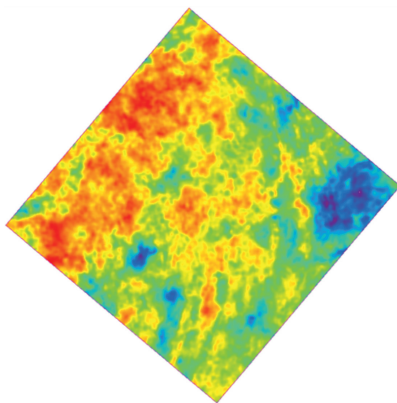


图 13 相控数据

Fig. 13 Inversion constraint data

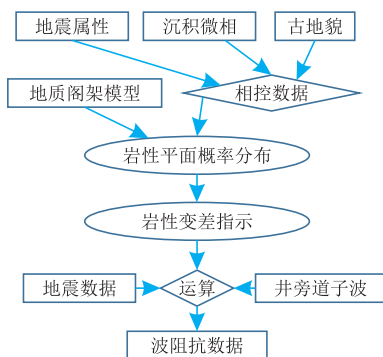


图 14 相控反演流程

Fig. 14 Facies controlled inversion flow chart

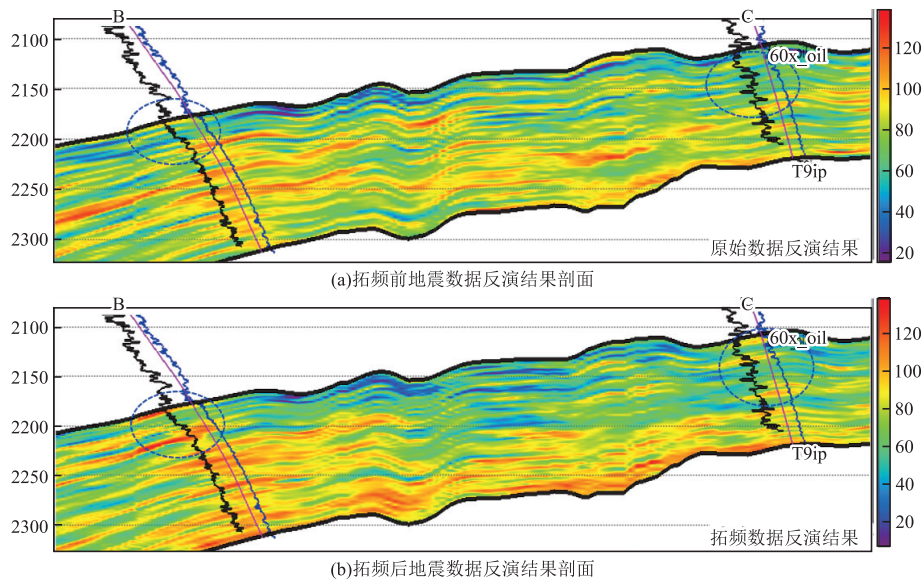


图 15 拓频前后波阻抗反演结果剖面

Fig. 15 Profile of wave impedance inversion results before and after frequency expansion

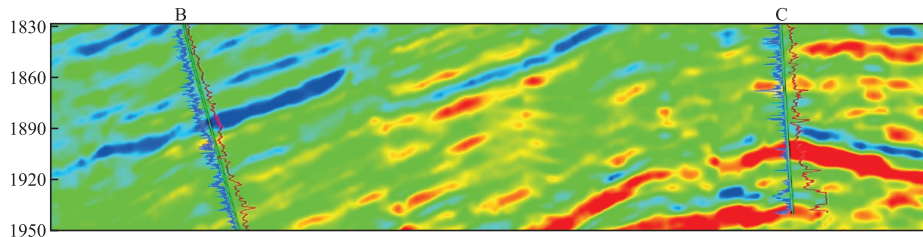


图 16 攻关前反演剖面

Fig. 16 Inversion section before research

数 C 的期望值, En_i 为云模型函数 C 的熵, He_i 为云模型函数 C 的超熵, n 为变换后生成离散概念的个数。

云变换流程如下:

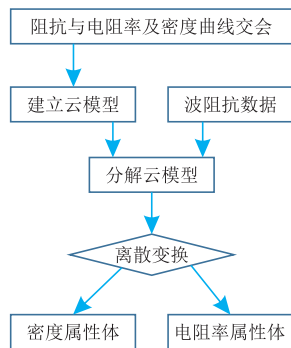


图 17 云变换流程图

Fig. 17 Cloud transformation flow chart

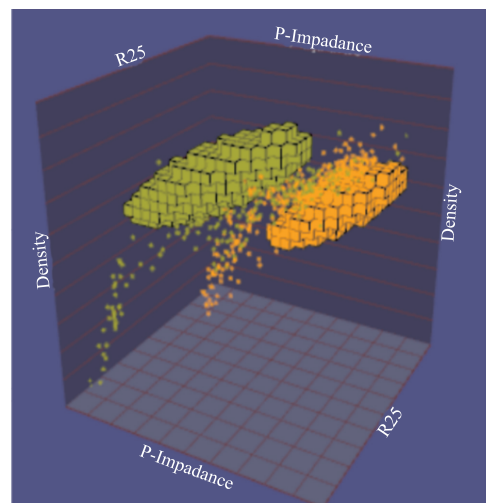


图 18 云模型

Fig. 18 Cloud model

云变换中关键部分为预测属性及波阻抗的概率密度统计,根据概率统计建立相应的概率函数,云模型的建立同样关键,尽量考虑交会云中大多数数据对。

通过测井曲线与预测密度及电阻率数据对比分析,显示与钻井吻合较高,横、纵分辨率高于地震,井间信息丰富,符合该区地质规律。

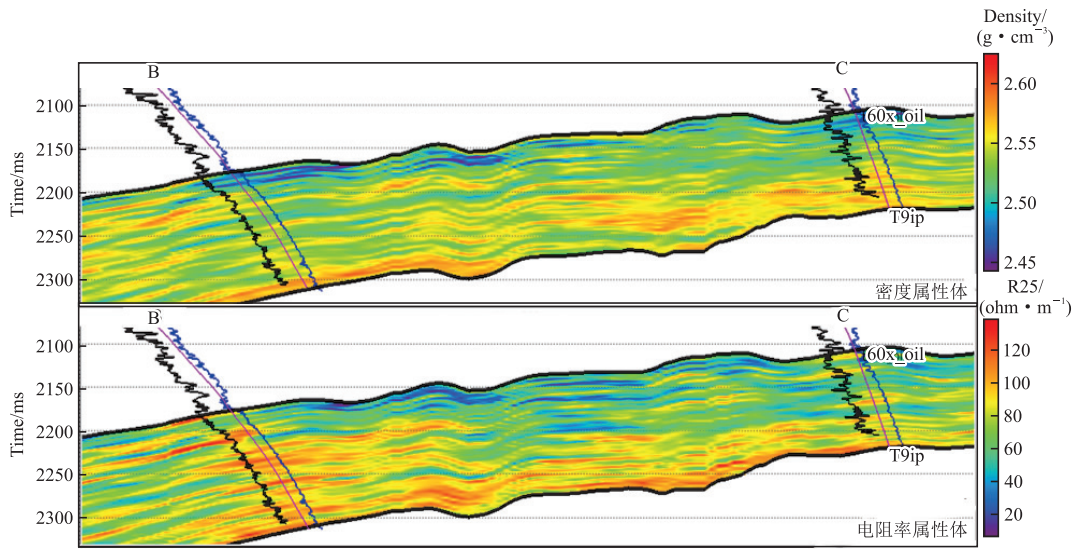


图 19 密度及电阻率剖面
 Fig. 19 Section of DEN & RT

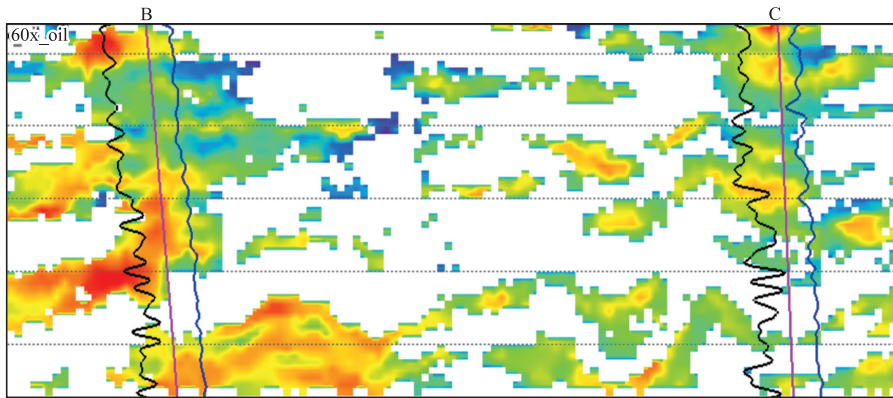


图 20 优质储层剖面
 Fig. 20 Section of high-quality reservoir

6 多种属性交会解释储层

根据数据分析中的图 5 及图 6 分析结果,以图 6 为解释模板,对云变换得到的密度数据体及电阻率数据体进行交会解释。在交会解释前,先分析一下密度及电阻率测井曲线的概率分布,然后对预测的密度及电阻率数据体同样进行概率分布统计,如果相应的曲线数值概率与预测数据体的数值概率分布一致,则可以直接利用解释模板进行交会解释。否则,则需要对预测数据体进行重新刻度,刻度到与相应测井曲线同一层段的概率统计值,然后进行交会解释。图 20 为根据图 6 模板进行交会解释结果剖面,剖面中镂空为别除非优质储层部分,剩余数据为优质储层部分。图 21 为目的层优质储层预测平面

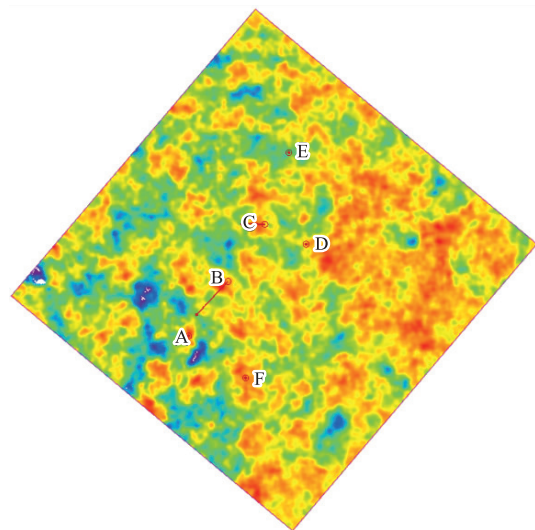


图 21 优质储层预测平面图
 Fig. 21 Map of high-quality reservoir

图,图 22 为目的层攻关前储层预测平面图(之前进行储层预测用的方法是稀疏脉冲反演),两者从视觉上有很大差异,攻关前预测结果与钻井钻遇储层误差较大,这也是本次攻关因素之一。研究区有 6 口探井钻遇目的层,通过预测储层与钻遇储层误差统计(表 2 为攻关前储层预测误差表),攻关前 D 井误差达到了 21 m,四口井误差超过了 8 m。本次攻关钻遇优质储层与预测优质储层对比(表 3 为目的层优质储层预测误差表),研究区内 6 口井误差均在 6 m 以内,达到了储层预测攻关目的。

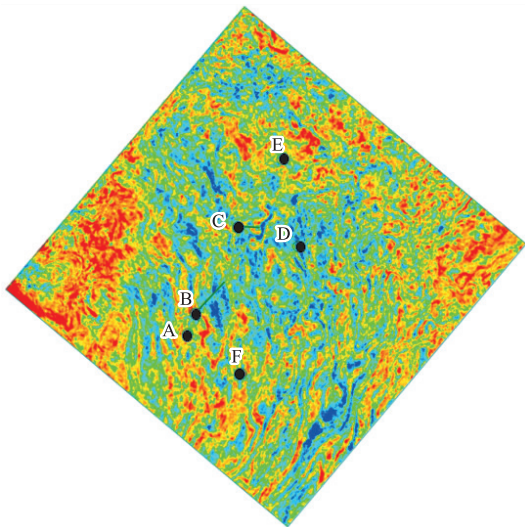


图 22 攻关前储层预测平面图

Fig. 22 Reservoir prediction map before key research

表 2 攻关前储层预测误差表

Tab. 2 The error table of reservoir prediction before research

井名	I+II 类油层厚度/m	预测厚度/m	相对误差
B	25	28	3
C	30	14	-16
F	31	16	-15
A	38.2	30	-8.2
D	26	5	-21
E	32.4	27	-5.4

表 3 优质储层预测误差表

Tab. 3 The error table of predicted high-quality reservoir

井名	I+II 类油层厚度/m	预测厚度/m	相对误差
B	25	30	5
C	30	33	3
F	31	34	3
A	38.2	35	-3.2
D	26	29	3
E	32.4	27	-5.4

7 结论

储层预测的精度受多种因素制约,抽丝剥茧可以简化为两种因素:地震和测井。地质认识也是一个重要因素,根据研究区的储层特点采取相应技术(或组合技术)进行储层预测。

研究区内复杂的地质情况用单一技术很难取得好的效果,通过对该区的基础数据分析及以往经验,首先制定了地震拓频处理;其次是断层三维建模;再次是二维相控约束反演;然后是在相控反演结果的基础上通过云变换预测电阻率、密度等数据体;最后根据解释模板进行交会解释储层等一系列技术的组合应用,得到优质储层分布范围,达到了储层预测攻关的目的。

该方法的核心是基础数据的分析,根据数据及地质特点在条件约束下进行储层预测。

参考文献:

- [1] 王跃刚. 利津油田利 95—利 98 井区沙四段砂砾岩储层有效性研究及预测[J]. 长江大学学报(自科版), 2016, 13(35): 8—12.
WANG Y G. The effect and prediction of glutenite reservoir of the fourth member of Shahejie formation in well block Li₉₅—98 of Lijin oilfield[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2016, 13(35): 8—12. (In Chinese)
- [2] 孙海宁, 王洪宝, 欧浩文, 等. 砂砾岩储层地震预测技术[J]. 天然气工业, 2007, 27(增刊 1): 397—398.
SUN H N, WANG H B, OU H W, et al. Seismic prediction technology of glutenite reservoir[J]. Natural Gas Industry, 2007, 27(Suppl 1): 397—398. (In Chinese)
- [3] 程亮, 孔庆丰, 宋建国. 步进迭代法井地联合地震资料拓频处理[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(4): 696—703.
CHENG L, KONG Q F, SONG J G. A step-by-step iteration for joint frequency expanding[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52(4): 696—703. (In Chinese)
- [4] 季焕成, 王江, 刘荷冲, 等. 双向拓频高分辨率地震技术在乌夏断裂带的应用[J]. 地球物理学进展, 2022, 37(1): 201—212.
JI H C, WANG J, LIU H C, et al. Application of bi-directional extension frequency high-resolution seismic technique in Wuxia fault zone[J]. Progress in Geophysics, 2022, 37(1): 201—212. (In Chinese)
- [5] 李迪. 混合相位子波拓频技术在东营凹陷青南洼陷的应用[J]. 科技传播, 2014, 6(10): 186.
LI D. Application of mixed phase wavelet frequency spreading technology in Qingnan Sag of Dongying Sag

- [J]. Public Communication of Science & Technology, 2014, 6(10): 186. (In Chinese)
- [6] 杨培杰. 复数域约束最小二乘拓频[J]. 石油地球物理勘探, 2021, 56(6): 1244—1253.
YANG P J. Constrained complex-domain least-squares spectrum blueing [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(6): 1244—1253. (In Chinese)
- [7] 纪甜甜, 张武, 任红, 等. 谱蓝化拓频处理技术在春光区块的应用[J]. 非常规油气, 2015, 2(3): 22—26.
JI T T, ZHANG W, REN H, et al. Application of spectral blueing frequency-broadening technique in Chunguang Block [J]. Unconventional Oil & Gas, 2015, 2(3): 22—26. (In Chinese)
- [8] 孙夕平, 张研, 张永清, 等. 地震拓频技术在薄层油藏开发动态分析中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 2010, 45(5): 695—699.
SUN X P, ZHANG Y, ZHANG Y Q, et al. Application of seismic frequency expanding technique in dynamic analysis of thin reservoir development [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(5): 695—699. (In Chinese)
- [9] 周宗良, 吴刚, 肖建玲, 等. 地震拓频处理技术在歧口深层气藏储层预测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(5): 604—609.
ZHOU Z L, WU G, XIAO J L, et al. The application of seismic frequency expanding processing technique to deep gas reservoir prediction in qikou [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2015, 12(5): 604—609. (In Chinese)
- [10] 张慧, 潘懋, 曹凯, 等. 复杂断层网建模关键技术[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(20): 281—285.
ZHANG H, PAN M, CAO K, et al. Key technology of complex fault net modeling [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(20): 281—285. (In Chinese)
- [11] 沈贵红, 仲学哲, 赵慧慧, 等. 复杂构造油藏精细断层建模方法与应用[J]. 中国石油大学胜利学院学报, 2021, 35(3): 12—16.
SHEN G H, ZHONG X Z, ZHAO H H, et al. Methods and application of subtly fault modeling in complex structural reservoirs [J]. Journal of Shengli College China University of Petroleum, 2021, 35(3): 12—16. (In Chinese)
- [12] 曲良超, 卞昌蓉. 井震结合断层建模技术在复杂断块中的应用[J]. 断块油气田, 2012, 19(4): 426—429.
QU L C, BIAN C R. Application of fault modeling combined with well data and seismic data in complicated fault block [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2012, 19(4): 426—429. (In Chinese)
- [13] 段新意, 李尧, 郭军, 等. 相控地质统计学反演方法及其在油田开发中的应用[J]. 断块油气田, 2021, 28(5): 683—690.
DUAN X Y, LI Y, GUO J, et al. The facies-control geostatistical inversion method and its application in development stage of oilfield [J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(5): 683—690. (In Chinese)
- [14] 刘雷颂, 安鹏, 李强强等. 不同维度相控地质统计反演的效果与分析[A]. 中国石油学会 2021 物探技术研讨会, 2021: 705—708.
LIU L S, AN P, LI Q Q, et al. Effect and analysis of phase-controlled geostatistical inversion in different dimensions [A]. China Petroleum Institute 2021 Geophysical Technology Seminar. 2021: 705—708. (In Chinese)
- [15] LIU L S, GAO J, DAI S H, et al. Application of cloud transforms in seismic reservoir prediction [C]// SEG Technical Program Expanded Abstracts 2013. Society of Exploration Geophysicists, 2013: 2480—2483.

The application of combination technology in predicting high-quality reservoir in the W block of the Erlian exploration area

LIU Leisong¹, ZHANG Hao¹, XING Yawen², GUO Zenghu¹, ZHAO Yi², WANG Yanan¹, LI Liang¹

(1. BGP Geological Research Center, CNPC, Zhuozhou 072751, China;

2. Exploration Department of Huabei Oilfield Branch, CNPC, Renqiu 062550, China)

Abstract: The Erlian Basin is mainly a tiny lake basin, and the facies belt changes rapidly in the horizontal direction, less than 2 km and 3 km. The fan types are diverse, and the structure is complex. Through data analysis, it is clear that the seismic resolution is low, and the wave impedance curve can roughly distinguish sand and mudstone, but it is not sensitive to high-quality reservoirs. The resistivity and density curves are relatively sensitive to high-quality reservoirs. Based on data analysis, a high-quality reservoir prediction process is developed: first, the seismic data is processed by frequency extension; secondly, fault modeling and two-dimensional phase-controlled geostatistical inversion are carried out. Third, the density and resistivity data volume are predicted by cloud transformation; finally, through the high-quality reservoir interpretation template, the intersection interpretation is carried out to predict the distribution of high-quality reservoirs. The predicted results have reached expectations.

Keywords: frequency extension; crossplots; acies-controlled inversion; cloud transform