

塔河油田 3 区石炭系超深薄层碎屑岩储层预测研究

盛海波¹, 刘蕊¹, 付国民², 蔡玥², 张庭娇²

(1. 中国石油化工股份有限公司 西北油田分公司, 新疆 乌鲁木齐 830011;

2. 长安大学 地球科学与资源学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 针对塔河油田 3 区石炭系卡拉沙依组地震数据很难识别薄砂体的问题, 对比分析了采用地震资料提频处理、分频处理、储层高分辨率敏感参数反演等不同手段得到的储层预测结果, 筛选出高分辨率储层敏感参数反演作为卡拉沙依组砂泥岩段储层主要预测手段。通过探讨砂泥岩对声波时差的响应, 以及对比分析自然电位、自然伽马以及补偿中子孔隙度与声波时差的关系, 确定自然电位与声波时差的相关性最好, 由此选取自然电位作为最佳电性敏感参数参与高分辨率敏感参数反演预测。从井点、剖面、平面等方面检验和评价高分辨率储层预测成果, 结果表明其反演预测效果较好, 符合塔河油田 3 区石炭系的储层预测要求, 实现了对石炭系主力砂体空间展布的解释与描述, 建立了塔河油田 3 区石炭系卡拉沙依组储层模型。

关键词: 碎屑岩; 储层预测; 敏感参数; 高分辨率反演; 声波时差; 自然电位; 波阻抗; 塔河油田

中图分类号: P618.13; TE122.2 文献标志码: A 文章编号: P1672-6561(2011)04-0390-07

Study on Reservoir Forecasting for Ultra Deep Thin Clastic Rock of Carboniferous System in Block 3 of Tahe Oilfield

SHENG Hai-bo¹, LIU Rui¹, FU Guo-min², CAI Yue², ZHANG Ting-jiao²

(1. Northwest Oilfield Branch Company, China Petroleum and Chemical Corporation, Urumqi 830011, Xinjiang, China;

2. School of Earth Sciences and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: In order to improve the identification of thin sand body according to the seismic data of Carboniferous Kalashayi Formation in Block 3 of Tahe Oilfield, the reservoir forecasting results by the means of seismic data frequency extraction, frequency separation and high resolution sensitive parameter inversion were compared, and then high resolution sensitive parameter inversion was considered as the main forecasting method for sand body reservoir of Kalashayi Formation. The response of sandstone and mudstone to acoustic travel time was discussed, and the relationships of spontaneous potential, natural gamma and porosity compensated neutron log to acoustic travel time were studied; the results showed that the relativity between spontaneous potential and acoustic travel time was best, so spontaneous potential was selected as the optimal electrical sensitive parameter of high resolution sensitive parameter inversion. The results showed that the inversion results were good according to the evaluation on well point inversion, profile inversion and plane inversion, and could be used to forecast reservoir of Kalashayi Formation in Block 3 of Tahe Oilfield; the explanation and description of space distribution of Carboniferous sand body could be explained and described easier; the reservoir model of Carboniferous Kalashayi Formation in Block 3 of Tahe Oilfield was built.

Key words: clastic rock; reservoir forecasting; sensitive parameter; high resolution inversion; acoustic travel time; spontaneous potential; wave impedance; Tahe Oilfield

0 引言

随着塔河油田 3 区石炭系油气田勘探开发的不断

断深入, 卡拉沙依组薄层超深复杂油藏储层规模的落实及有效开发, 对储层预测技术提出了更高要求^[1-5]。塔河油田 3 区石炭系卡拉沙依组薄层复杂

收稿日期: 2011-01-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2006CB202402)

作者简介: 盛海波(1975-), 男, 湖北黄冈人, 工程师, 工学硕士, 从事油田开发研究。E-mail: haibosheng@sohu.com

碎屑岩油藏在储层预测技术方面存在以下难点。

(1)薄砂体与三维地震资料分辨率不适应的问题。塔河油田3区石炭系卡拉沙依组油藏埋藏深(埋深4 800~5 400 m,地震数据主频35~41 Hz,对应卡拉沙依组反射层砂岩的理论分辨率为26~32 m),砂体薄(一般3~8 m,最大不超过12 m),常规地震数据的有效频带和分辨率不能满足卡拉沙依组地层特征描述的要求^[6-7]。

(2)塔河油田3区石炭系卡拉沙依组主要为具有河口湾性质的潮坪沉积相,砂体厚度平面变化大,各井之间砂体可比性差(井距500~800 m),邻井之间砂体发育程度差别大;砂地比变化大,最高达0.44,平均为0.217,储层宏观非均质性较强^[8]。

(3)塔河油田3区石炭系卡拉沙依组砂岩与泥岩岩性、电性特征复杂^[9-11],尤其是阻抗差异规律性差,储层识别和预测难度大。

针对卡拉沙依组地震资料分辨率不能满足多数单砂体识别的问题,笔者对比分析了采用地震资料提频处理、分频处理、储层高分辨率敏感参数反演等不同手段得到的储层预测结果,筛选出高分辨率储层敏感参数反演作为卡拉沙依组砂泥岩段储层主要预测手段;并通过对比分析不同参数与声波时差的关系,提取参与高分辨率敏感参数反演的最佳电性敏感参数;最后从井点、剖面、平面等方面检验和评价了高分辨率储层预测成果。

1 储层预测方法探讨

鉴于石炭系卡拉沙依组砂泥岩段主要为泥包砂特征,砂体平面变化快,基本上为小于10 m的薄层。从理论上说,现有三维地震资料的分辨率不足以满足需求;因此,需要综合利用薄层识别和预测的相关技术^[12]进行对比分析,选择相对合理的薄层预测方法,实现卡拉沙依组储层的预测^[9]。

1.1 分频处理

分频处理用于识别岩性体和不同类型的储层已被广泛接受^[13-14]。该方法是通过提取不同频段的地震信息,分析、选择适合目的层段岩性体响应的频段实现对岩性体识别、解释和描述^[15]。针对塔河油田3区石炭系卡拉沙依组频率分布特点,分别提取10~20、20~30、30~40、40~50 Hz等4个频段的地震信息,从井点尤其是连井剖面,分析砂体变化与不同频段地震响应的一致性,选择一致性明显的数据体开展目的层段砂体解释^[16]。

图1为过TK335—TK333—TK327—TK307—

TK316井的连井剖面。可以看出剖面原始地震信息与砂体分布及其变化关系不明显。图2为过TK335—TK333—TK327—TK307—TK316井的不同频段处理数据的剖面。对比可以看出,由于卡拉沙依组砂、泥岩组合关系和不同厚度砂岩间的组合关系复杂,砂岩多以薄层为主,小于40 Hz的频段处理数据均不能表征砂体的变化,在40~50 Hz频段处理的地震剖面上,对少数厚度相对较大的砂体或砂岩集中发育段有所反映,但地震反射特征与原始地震差别较大,非均质特征变得不明显^[17]。

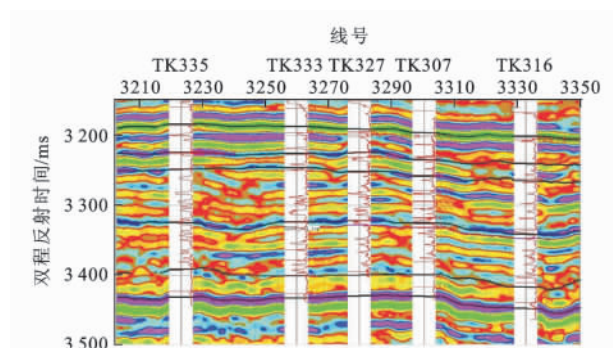


图1 过TK335—TK316井的连井剖面

Fig. 1 Seismic Section of Wells TK335-TK316

1.2 提频处理

提频处理是针对研究层段岩性体与当前地震主频不匹配问题,对地震数据体进行高频段放大处理。在分频处理的认识基础上,针对卡拉沙依组砂岩层薄的特点,对40 Hz以上的高频频段采用井引导的方法进行放大处理,获得基于原始地震数据高频段放大后的频谱处理数据体(图3)^[15]。

从图3对比看出,提频后的主频由原始的19 Hz提高到39 Hz,中心频率由原来的39 Hz提高到46 Hz,主频率范围变为37~55 Hz。图4为提频后的地震剖面与原始剖面40~50 Hz分频处理剖面的对比。提频后的地震数据频率明显提高,原始地震剖面的复波在提频处理后分成两个反射同相轴。提频后数据基本保持了原始地震数据的非均质特点,并且对部分厚度相对较大的砂体变化具有一定程度的响应。

1.3 测井约束高分辨率物性参数反演

地震反演分辨率遵循地震原理中1/4波长,这意味着小于1/4波长的砂体不能通过反演的方式进行表征^[18-19]。实际上,随着应用地球物理技术的发展,越来越多的薄层识别方法突破了理论分辨率界限,如基于等时格架解释框架下的切片技术、基于阻抗统计特征的储层参数反演技术等。由于受到卡拉

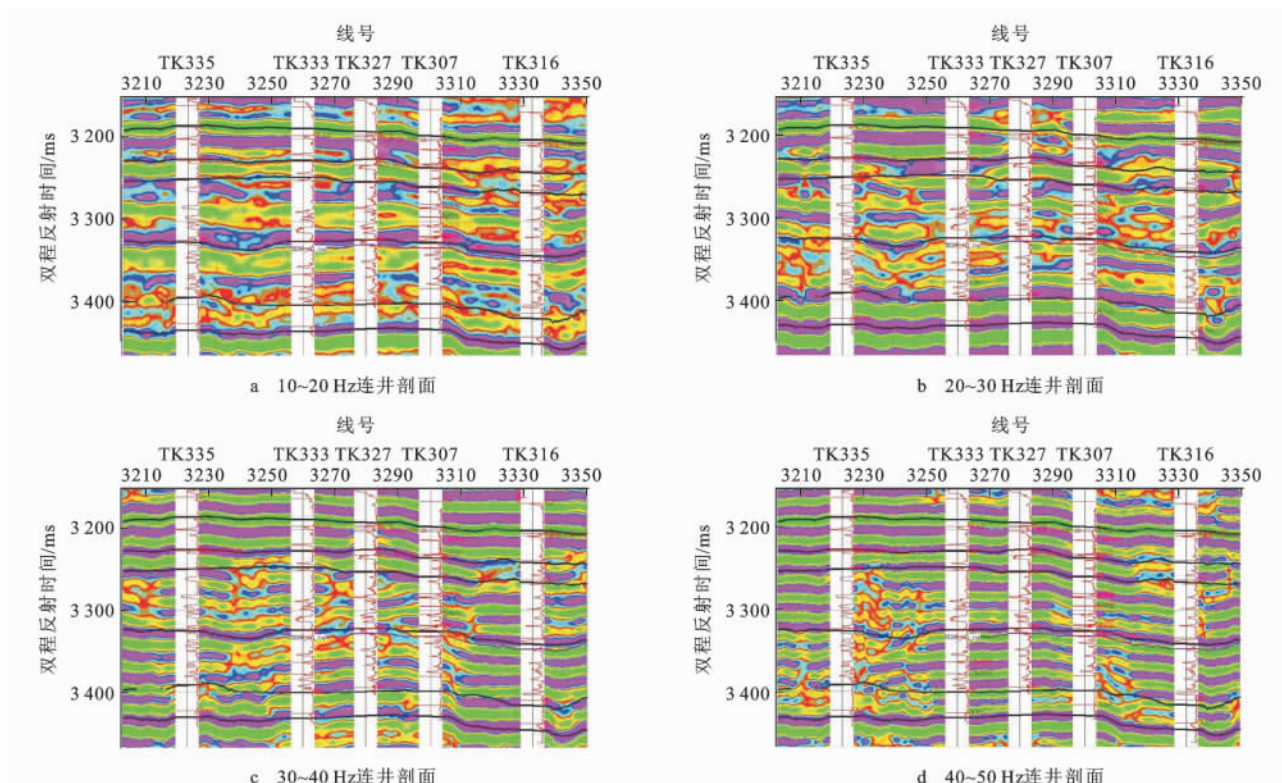
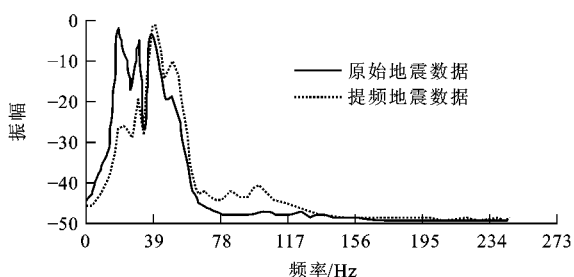


图 2 过 TK335—TK316 井提频处理连井剖面

Fig. 2 Seismic Section of Wells TK335-TK316 with Frequency Extraction



注:原始地震数据的主频率为 19.531 Hz,中心频率为 39.063 Hz,主频率范围为 17.536~45.680 Hz;提频地震数据的主频率为 39.063 Hz,中心频率为 46.875 Hz,主频率范围为 37.016~55.320 Hz。

图 3 S70 井附近地震数据提频前后的频谱对比

Fig. 3 Contrast of Spectrum Before and After the Frequency Extraction of Seismic Data

沙依组岩性变化和对比标志层缺乏的限制,基于等时界面的切片技术应用受到制约;而在大量储层预测实验的基础上,筛选出自然电位(V_{sp})作为储层地震最敏感参数,并对卡拉沙依组石炭系泥岩段以薄层为主油藏开展储层预测,是一个完全量化的预测方法^[12]。

1.3.1 反演原理

以自然电位反演为例来说明属性参数反演的原理(图 5)。自然电位反演与波阻抗(Z_{AI})反演的主

要区别在于反演约束的不同以及需要将自然电位转换成波阻抗。首先,利用反演区内的测井数据得到自然电位和波阻抗之间的统计关系,同时统计自然电位值在不同深度或者时间上的分布范围;然后,在自然电位概率分布和自然电位值在不同时间上的分布范围内随机抽样,得到一个自然电位序列($V_{sp}(t)$);其次,利用自然电位和波阻抗的统计关系,将自然电位序列转换为波阻抗序列($Z_{AI}(t)$);接下来的步骤和波阻抗反演过程相同(除扰动参数为自然伽马外)。这个反演过程既不破坏自然电位和波阻抗的概率分布函数,同时又满足地震响应^[12]。该方法可以用于与波阻抗相关的任意测井参数的反演,如孔隙度、自然伽马、泥质含量反演。

测井约束地震高分辨率参数反演技术是利用井阻抗统计特征建立约束,无需复杂的建模过程,而且通过解正问题来解反问题,使得约束比较容易实现^[20-21]。该技术采用概率为约束,即井中获取的“层序”分布,可以使单元层和重采样的测井一样薄;通过垂向的变化规律约束,使得空间上“薄层”满足其基本规律;通过调整单元层序列,并由垂向规律约束,满足了井上层划分要求,同时高度满足地震层序的要求,由此较薄的层就可以“模拟”出来^[20]。

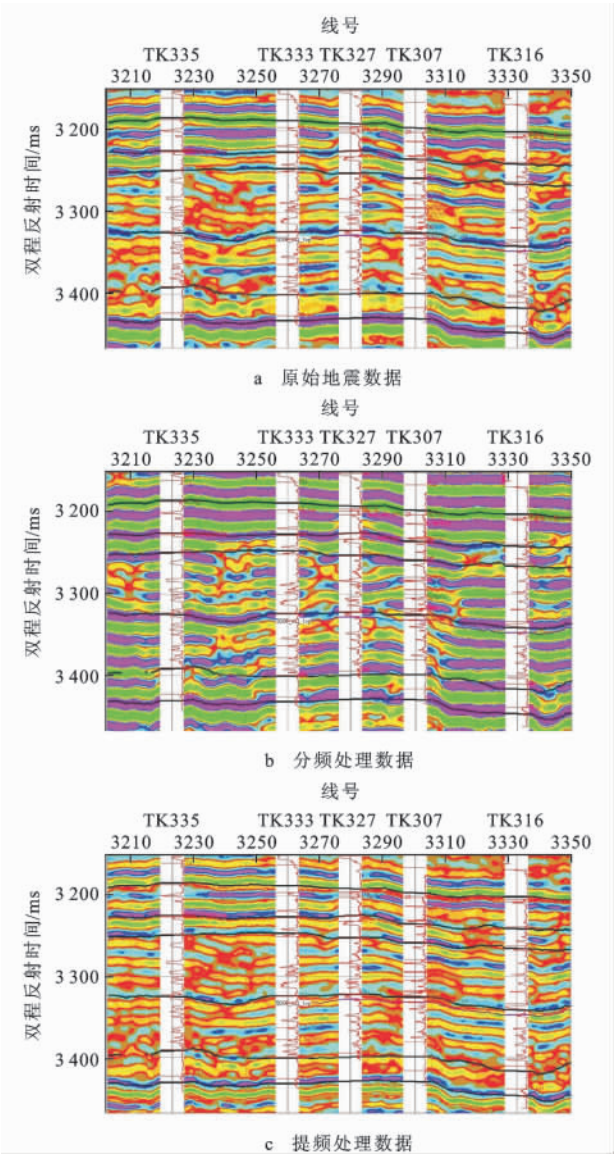


图 4 不同方法预测效果剖面对比
Fig. 4 Comparison of Result Profiles for Different Forecasting Methods

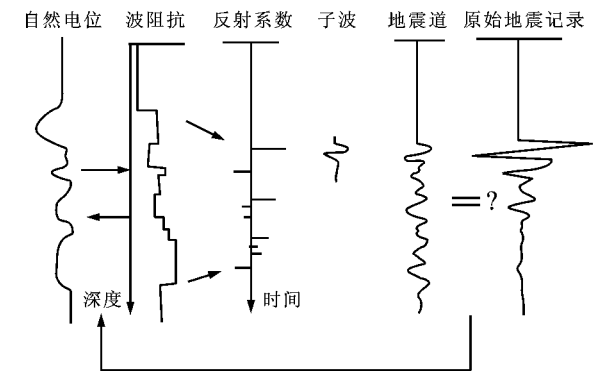


图 5 自然电位反演原理
Fig. 5 Sketch Map of Spontaneous Potential Inversion

1. 3. 2 储层敏感参数分析

(1)砂岩与泥岩的声波时差差异分析。根据测

井解释结果统计的各类岩性声波时差随深度的变化特征(图 6)可以看出,各类砂岩声波时差略低于泥岩,但二者重叠范围大,差异不明显。

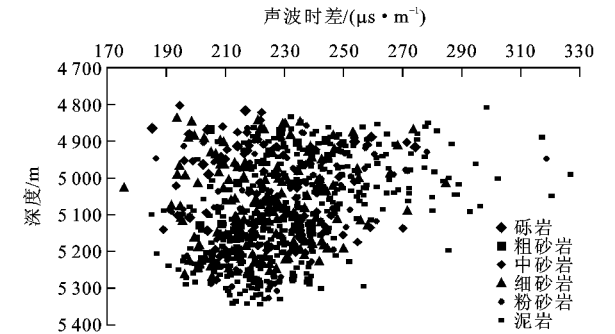


图 6 不同岩性声波时差与埋藏深度的关系
Fig. 6 Relationship Between Acoustic Travel Time and Depth for Different Lithology

(2)储层参数与声波时差的关系。图 7 为卡拉沙依组各类岩性归一化校正到 0~100 mV(泥岩基线在 100 mV 附近)之间的自然电位与声波时差关系散点图。砂岩与泥岩自然电位差异明显,分界值为 80 mV 左右;粉砂岩自然电位偏移不明显,其特征更接近于泥岩,试采资料也证实该区的主要产层为中砂岩和粗砂岩;而且中砂岩和粗砂岩的自然电位与声波时差具有较好的负相关关系,自然电位偏移越大,声波时差越高,储层物性也越好。

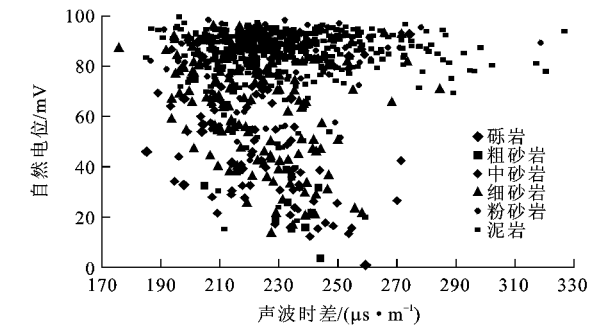


图 7 不同岩性自然电位与声波时差的关系
Fig. 7 Relationship Between Spontaneous Potential and Acoustic Travel Time for Different Lithology

图 8 为不同岩性自然伽马与声波时差关系散点图。砂岩与泥岩的自然伽马虽然也存在分区性,但有较大范围的交叉,不如砂、泥岩的自然电位分界更明显;而且,砂岩的自然伽马与声波时差相关性不明显,如果用来做反演储层预测,其结果不如自然电位更合理。

图 9 为不同岩性的补偿中子孔隙度与声波时差关系散点图。砂岩和泥岩具有一定的分区性,但存

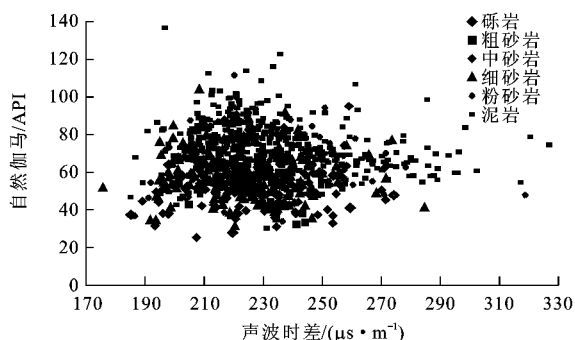


图 8 不同岩性自然伽马与声波时差的关系

Fig. 8 Relationship Between Natural Gamma and Acoustic Travel Time for Different Lithology

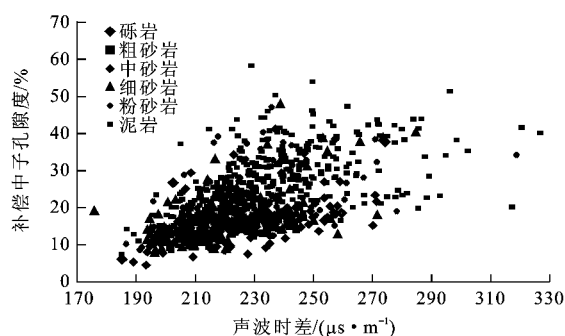


图 9 不同岩性补偿中子孔隙度与声波时差的关系

Fig. 9 Relationship Between Porosity Compensated Neutron Log and Acoustic Travel Time for Different Lithology

在明显的重叠区,且均存在正相关关系,但二者的拟合曲线斜率不同,泥岩的补偿中子孔隙度都随着声波时差的增大更加明显,因而被偿中子孔隙度越大,砂岩与泥岩的声波时差差异越明显。这种复杂的相关关系使得利用补偿中子孔隙度预测储层变得困难。

综上所述,在电性储层敏感电性参数中,以自然电位最为合理;因此,将自然电位确定为储层电性敏感参数^[22]。

1.3.3 储层敏感参数反演及最佳参数筛选

由于卡拉沙依组砂泥岩段砂岩与泥岩波阻抗差异不明显,波阻抗反演结果表征储层比较困难,不能更好地识别和解释储层,而自然电位与声波时差具有良好的相关关系,且实验表明自然电位能更好地表征本区的储层,所以采用自然电位的反演成果开展卡拉沙依组的储层展布预测^[22]。

2 高分辨率储层预测成果检验

为了评价反演结果的可靠性,从井点、剖面及平面 3 个方面进行高分辨率储层预测成果检验和评价^[23]。

2.1 井点效果检验

2.1.1 井点反演与实际对比

井点反演效果检验包括参与反演并自然电位反演的井旁道与井实际自然电位曲线的吻合情况。二者吻合说明反演结果尊重了井点信息。从研究区西部南北向、东西向两条自然电位反演连井剖面可以看出,各井点反演的自然电位井旁道与井实际自然电位曲线一致性好,且多数厚度在 4 m 以上的砂体在反演结果上能够得到响应。

2.1.2 抽稀井反演验证

为了分析自然电位高分辨率反演效果的合理性,进行抽稀井反演效果分析。分两次分别抽取不同的两口井进行反演,然后进行一次未抽稀井的反演,分别对比未抽稀和抽稀后的反演结果,统计两次反演识别出的砂体数。结果表明,两次抽稀井反演 4 口检验井识别出的砂体数为 0.71%~0.80%(表 1)。

表 1 抽稀井反演实验识别砂体的符合率统计

Tab. 1 Statistics of Coincidence Rate of Sand Body Identification with the Experiment Extracting Wells Inversion

检验期次	检验井	参与反演砂体数	不参与反演砂体数	符合率/%
第一次反演检验	TK331	5	4	80
	TK338	9	7	78
第二次反演检验	TK328	7	5	71
	TK337	9	7	78

本次自然电位反演对 90% 以上大于 6 m 的砂体都可以很好地反映出来,通过调整色标能够识别和解释出 3~6 m 的含油砂体,抽井反演分析对 5 m 以上砂体的符合率为 71%~80%。

2.2 剖面效果检验

合理的反演结果不仅应该尽可能符合地井点实际数据,而且应该尊重反演所用的原始地震信号。对于砂体变化大、非均质性强的塔河油田 3 区石炭系卡拉沙依组地层,反演得到的砂体变化规律应与原始地震信号变化规律具有一致性,否则反演结果就失去了合理性。通过 11 条连接全区 52 口井的自然电位反演剖面叠加振幅剖面分析,可以看出本次反演结果充分尊重了原始地震信号及其变化,同时从剖面特征上来看,反演结果中自然电位的分布及其变化与振幅信息具有一致性,因此反演结果相对于原始地震信息而言是可信的。

图 10 为 TK318—TK336 井区 2 个不同方向的自然电位反演剖面,较好地反映了石炭系卡拉沙依组储层反射特征,与井点实钻情况符合程度很高。

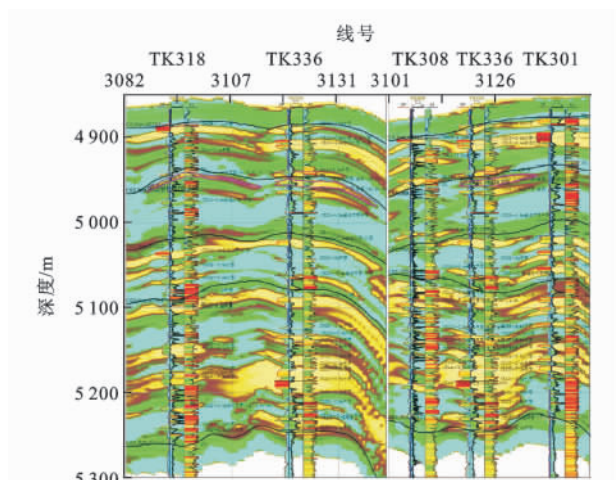


图10 TK318—TK336井区自然电位反演剖面
Fig. 10 Spontaneous Potential Inversion Section
in Wells TK318-TK336

2.3 平面效果检验

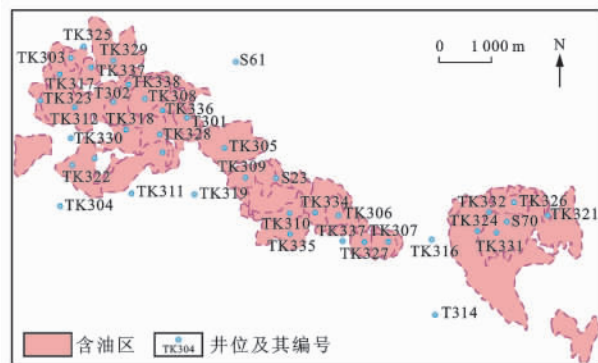
(1)反演砂体平面分布与区域沉积规律一致性分析。评价反演结果的合理性,一方面是利用过井地震剖面分析反演的合理性,另一方面是反演数据的平面分布特点是否符合区域沉积规律。如果两者一致性不明显甚至相矛盾,那么对这类反演结果的可信度评价将显著降低,据此得到的砂体分布成果将不可信赖。因此,需要对由反演数据得到的平面预测成果进行分析,与区域沉积规律和单井相分析得出的沉积环境特征对比,判断是否具有 consistency。

本次对自然电位反演数据体以砂层组为单元进行平面属性提取,提取包括由自然电位确定的储层下限有效样点数及其所占地层厚度百分比;通过对比砂体分布与区域沉积、各砂组砂体变化与砂体在垂向上的演化规律,发现均具有较好的一致性。

(2)反演砂体平面分布与油藏生产动态一致性分析。一般油藏的分布与构造、储层分布及储盖组合特点密切相关,但塔河油田3区石炭系油井生产动态与构造特征并不具有完全的一致性,说明除了构造因素的控制作用外,岩性对卡拉沙依组油藏也具有重要的控制作用,这种作用应与砂体的发育特点及其分布规律具有一致性。

反演砂体具有南北向展布的特点,与古地形特征和环境特征相一致,且生产井多分布于各砂层组砂地比较低的部位,这与砂体平面分布变化大、砂体向上倾尖灭部位易于成藏等特点相一致。

(3)反演结果解释砂体是否存在油水矛盾分析。通过对含油单元油水关系分析,均未发现明显的油水关系矛盾。图11为塔河油田3区石炭系卡拉沙



- [2] 刘蕊,盛海波,蔡玥,等.塔河油气田 AT1 区块凝析气藏三维地质建模研究[J].地球科学与环境学报,2011,33(2):168-171.
- [3] 付国民,周丽梅,刘蕊,等.塔河三叠系下油组河流相储层夹层成因类型及其分布规律[J].地球科学与环境学报,2009,31(3):260-264.
- [4] 马晓娟,张忠民,陈占坤.塔河南部志留系柯坪塔格组层序地层及沉积相[J].西南石油大学学报:自然科学版,2011,33(3):35-40.
- [5] 张荣军,李海军,任月玲.塔河油田深层稠油渗稀降黏技术[J].西安石油大学学报:自然科学版,2009,24(3):84-87.
- [6] 李斌,杨迎春,何玉萍,等.塔河油田卡拉沙依组地震沉积学研究及储层预测[J].现代地质,2009,23(6):1107-1112.
- [7] 尹成,王治国,雷小兰,等.地震相约束的多属性储层预测方法研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2010,32(5):173-180.
- [8] 何发岐,翟晓先,俞仁连,等.塔河油田石炭系卡拉沙依组沉积与成因分析[J].石油与天然气地质,2004,25(3):258-262.
- [9] 邵洪伟,马青,邓强,等.轮南地区石炭系砂泥岩段 S3 层储层特征与评价[J].地球科学与环境学报,2010,32(1):54-59.
- [10] 徐智,艾丽.塔北轮南古隆起石炭系砂泥岩段沉积相特征[J].西安石油大学学报:自然科学版,2011,26(2):31-38.
- [11] 郭兰,唐华佳,徐正华,等.轮古东地区石炭系东河砂岩段沉积相[J].西安石油大学学报:自然科学版,2010,25(2):23-26.
- [12] 王香文,于常青,董宁,等.储层综合预测技术在鄂尔多斯盆地定北区块的应用[J].石油物探,2006,45(3):267-271.
- [13] Huang X R, Kelkar M G. Application of Combinatorial Algorithms for Description of Reservoir Properties[C]// Society of Petroleum Engineers. SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium, Tulsa; Society of Petroleum Engineers, 1994:20-36.
- [14] 赵永斌,武士尧,唐晓川.分频技术在大庆高台子油田扶扬油层储层预测中的应用[J].西安石油大学学报:自然科学版,2009,24(5):18-22.
- [15] Huang X R, Kelkar M G. Seismic Inversion Using Heuristic Combinatorial Algorithm: a Hybrid Scheme[C]// Society of Exploration Geophysicists. Proceedings of 66th International SEG Annual Conference, Denver; Society of Exploration Geophysicists, 1996:119-125.
- [16] 朱定,孙素琴,蒋进勇.分频解释技术在塔河油田储层预测中的应用[J].石油与天然气地质,2010,31(1):49-53.
- [17] 王元君.塔河油田 SD 地区石炭系卡拉沙依组薄砂体预测[J].石油物探,2008,47(5):488-493.
- [18] 王智,许江文,谷斌.基于测井资料的低孔低渗储层产能预测研究[J].西南石油大学学报:自然科学版,2009,31(6):51-55.
- [19] 陈宁宁,杨少春,黄建廷.胜坨油田沙河街组二段复杂断块油藏水淹层测井解释研究[J].地球科学与环境学报,2010,32(4):355-362.
- [20] 陈守田,孟宪禄.薄互层储层预测方法[J].石油物探,2004,43(1):33-36.
- [21] 刘振华,成志刚,仵杰.高分辨率双侧向和双感应测井联合反演[J].西安石油大学学报:自然科学版,2010,25(6):23-27.
- [22] 沈华,尹微,徐佑平.提高砂岩油藏储层预测精度的方法[J].大庆石油地质与开发,2005,24(3):24-27.
- [23] 白斌,周立发,丁国栋,等.储层综合预测技术在太康地区上古生界的应用[J].石油物探,2007,46(3):261-266.

(上接第 357 页)

(3) 祥摆组潟湖相沉积体系区域上主要位于平塘县与独山县之间;构成潟湖与外海的障壁主要在摆者至麻尾一线,呈北西向延伸;在北部兔场附近祥摆组已过渡为以泛滥平原沉积体系为主。

参加贵州省野外剖面实测工作的还有刘家洪、朱志军、徐胜林,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 卫平主,林树基,陈玉林,等.贵州省岩石地层[M].武汉:中国地质大学出版社,1997.
- [2] 王增吉.中国地层 8:中国的石炭系[M].北京:地质出版社,1990.
- [3] 贵州省地层古生物工作队.西南地区区域地层表:贵州分册[M].北京:地质出版社,1978.
- [4] 中国地质科学院.中国地层概论[M].北京:地质出版社,1982.
- [5] 金玉环,范影年,王向东,等.中国地层典:石炭系[M].北京:地质出版社,2000.
- [6] 吴祥和,季强,陈笑媛.扬子地台西南缘下石炭统中间界线地层[J].地层学杂志,1997,21(4):253-258.
- [7] 杨艳飞,徐一帆,周承艳.上扬子地台留茶坡组与灯影组关系初探[J].贵州地质,2009,26(4):248-252.
- [8] 廖士范.贵州早石炭世古风化壳相铝土矿地层时代及其与邻省对比问题[J].贵州地质,1988,5(4):342-348.
- [9] 吕天权,李沛刚,和秀林,等.黔北务正道铝土矿找矿标志及找矿模式[J].贵州地质,2009,26(4):260-264.
- [10] 冯怀煊.贵州下石炭统大塘组硬质高岭土矿成矿地质特征[J].建材地质,1992(5):23-25.
- [11] Grant R E. Spine Arrangement and Life Habits of the Productoid Brachiopod Waagenoconcha[J]. Journal of Paleontology, 1966,40(5):1063-1069.
- [12] 周洪庆.黔中下石炭统特征及其地质意义[J].贵州师范大学学报:自然科学版,1999,17(3):64-68.