

塔北超深层碳酸盐岩储层预测方法和技术

李宗杰¹, 王勤聪²

(1. 成都理工大学, 四川成都 610059; 2. 西北石油局工程技术研究中心, 新疆乌鲁木齐 830011)

摘要:塔北塔河油田碳酸盐岩储层具有埋藏深、地震反射信号弱和非均质性强的特点。针对这一特点,一是采用地震层拉平技术恢复古地貌,利用地震振幅属性参数恢复古水系,以此为基础,分析岩溶性储层发育的有利部位;二是利用相干体、振幅、波阻抗反演、约束测井反演等地震属性参数进行储层有效性分析;三是运用模式识别预测含油性。为避免单一参数的局限性,可采用直方图、二维交会图、三维交会图等方法综合运用多种参数进行储层和含油气性预测。实际应用证实效果良好,根据古地貌分析预测的碳酸盐岩储层有利分布区与实际相符;古水系的研究为地下河、溶洞的展布提供了可靠的地质依据;波阻抗反演、振幅、相干参数预测的储层吻合率达80%,模式识别预测含油气性经钻井证实是正确的;直方图预测区域钻井符合率达70%以上,二维、三维交会图的分析有利储层的分布提供了可靠的技术手段。

关键词: 古地貌; 古水系; 振幅提取; 相干计算; 波阻抗反演; 模式识别; 多参数分析

第一作者简介:李宗杰,男,34岁,高级工程师(博士生),应用地球物理

中图分类号: P618.130.2⁺1

文献标识码: A

塔河地区奥陶系碳酸盐岩储层是塔里木盆地北部油气勘探的主要目的层之一。该储层具有两个显著特点,一是目的层埋藏深(大都在 5 300 m 以下),地震反射信号较弱;二是储集空间为构造裂缝及溶蚀孔、洞、缝系统,纵向及横向非均质性强。

随着勘探开发程度的不断深入,在碳酸盐岩储层预测研究中主要存在以下 3 个方面的问题:(1) 探索碳酸盐岩储层预测的地球物理方法技术系列;(2) 区别碳酸盐岩储集空间内充填物的性质,即油、气、水、硅质、砂泥质、方解石等,也就是含油气性判别;(3) 建立碳酸盐岩储层的地质、地球物理模式。

1 内容及方法

通过对塔河地区碳酸盐岩储层特点、预测难点的分析和长时间的摸索和实践,确定了如图 1 所示的碳酸盐岩储层预测研究流程。初步探索出了有效的技术方法系列,下面将介绍各种方法的基本原理和应用条件。

1.1 古地貌、古水系

塔北奥陶系碳酸盐岩古岩溶发育的时期主要为海西早期, 部分地区为海西晚期。

古岩溶发育程度受岩性、构造、气候、岩溶持续时间等多种因素控制^[1], 其中构造是控制古岩溶发

育的重要外在因素之一,主要表现为:(1)构造背景是古岩溶发育的基础;(2)构造格局控制了岩溶地貌的分区;(3)断裂和裂缝是地下水重要通道,对古岩溶的发育具有重要控制作用。因此对古地貌、古水系的研究是进行奥陶系储层预测的重要环节。

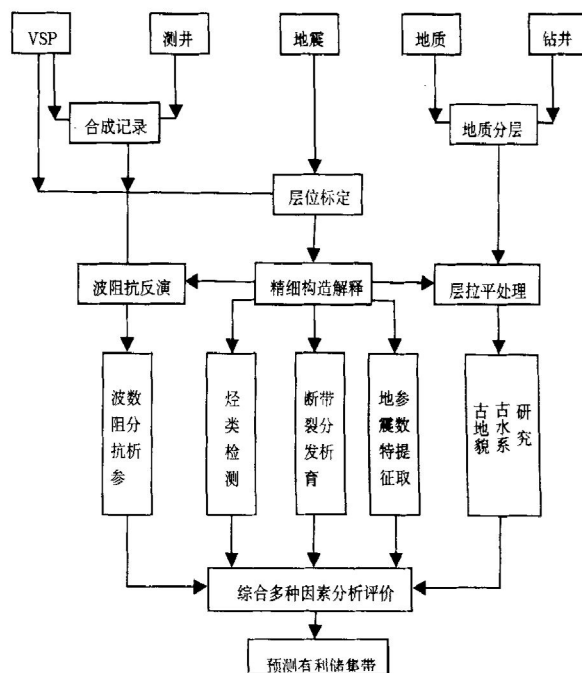


图 1 利用地震资料预测碳酸盐岩储层研究框图

Fig. 1 Block diagram of carbonate reservoir prediction with seismic data

石炭系底部巴楚组是在中下奥陶统风化壳之上的填平补齐式沉积, 其厚度可间接反映中下奥

陶统风化壳型岩溶的地貌特征。石炭系巴楚组顶部的双峰灰岩是区域标志层,它代表一种沉积环境相对稳定情况下的沉积。利用地震层拉平技术将地震数据体或奥陶系顶面构造图沿双峰灰岩顶面拉平,拉平后的奥陶系顶面的构造面貌,基本代表了海西早期岩溶发育时的地貌特征。根据古地貌特征,就可以确定岩溶高地、岩溶斜坡、岩溶洼地,从而预测碳酸盐岩储层的有利分布范围。

古水系发育的研究是古岩溶研究的又一个重要环节,应在精细构造解释的基础上进行。将地震的层拉平技术和三维立体可视化解释技术相结合,通过振幅属性的调整,结合钻井岩芯、测井解释的数据进行标定,直接利用三维地震数据体分析古地表水系、地下水系的发育情况,从而利用古水系的分布规律来预测碳酸盐岩储层的有利分布区域。

1.2 地震特征参数

1.2.1 相干体

相干体技术是利用地震信息计算各地震道之间的相关性,突出不相关的异常现象。一般认为,原始地层沉积时,地层是连续的,即使在横向上有变化也是一种渐变过程。所以地震波在横向上基本是相似的。影响地震道之间不相关的因素较多,如地震资料处理的噪音、地层倾角变化、岩性变化、地层中存在的断层和裂缝,以及火成岩体、礁体、盐丘及泥岩刺穿体等都会影响地震道的相关性。在塔河地区奥陶系碳酸盐岩储层段若地震资料品质好,横向岩性变化不大,断裂的位置可通过地震剖面解释确定,因此影响地震道不相关因素主要是裂缝及溶蚀孔洞和微小断裂,即碳酸盐岩的主要储集空间,所以利用相干体技术可以预测碳酸盐岩的孔、洞、缝发育带。但相干体只是宏观预测碳酸盐岩孔、洞、缝的发育带,至于孔、洞、缝中充填的是油、气、水,还是泥质、钙质、硅质则不能区分,虽然这些物质的充填也会引起地震道之间的不相关性,至于不相关的程度有多大,尚不能判别,因此还要借助于其他方法。

1.2.2 振幅

影响地震反射波振幅的因素较多,除地震数据采集、处理因素外,影响振幅的还有孔、洞、缝的发育程度。一般认为储层中孔洞缝发育则会使振幅减小,因此振幅提取技术是预测碳酸盐岩储层的有

效手段之一,它可以指出碳酸盐岩孔、洞、缝发育带,但不能区分其充填物。孔洞中充填物不同,则振幅衰减的程度也不同,能否分辨还要取决于地震波的分辨率。

1.3 波阻抗反演

地震资料反演的波阻抗数据,是进行岩性解释的有效手段,根据反演的约束条件不同,可分为无井约束反演、单井约束反演、多井约束反演。反演的算法也有很多种,影响反演结果的因素有以下几个方面。

(1) 地震基础数据的资料品质。品质好(信噪比高、分辨率高、保真度高),反演效果好,否则差。

(2) 针对碳酸盐岩储层,声波测井曲线能否正确反应裂缝发育带及不发育带,直接影响着测井约束反演的结果。若声波时差曲线不能反应裂缝发育带,就要通过其他的测井曲线如侧向电阻率曲线来建立速度模型,进行正演,与已知井旁道进行对比,以校正声波时差曲线,提高反演的精度和效果。

(3) 约束反演子波的提取与确定,也是影响波阻抗反演成果的因素。子波在时间上和空间上是变化的,尤其是利用多口井确定的子波,反演中用一个,还是都用,也会影响波阻抗反演结果的精度。

(4) 约束反演中,初始模型的建立,也就是精细层位标定和解释,是反演结果好坏的基础。

(5) 对声波测井曲线进行环境校正,制作精度高的合成地震记录是反演的关键。

(6) 参与测井约束反演的井越多,反演的结果越可靠。

碳酸盐岩地层是高波阻抗岩层,当岩层中存在孔、洞、缝发育带时,波阻抗值会降低,因此低波阻抗带基本反映了储层的发育带。但低波阻抗带也只是反映了孔洞缝发育带,至于其充填物是油、气、水还是泥质、砂泥、硅质,还要依据波阻抗反演的分辨率以及充填物与基质、围岩的波阻抗差别大小来判别。

若取灰岩速度为 6 350 m/s,灰岩孔隙度取 4%,按时间平均方程计算,当孔隙充填气体时(取 $V=340$ m/s)速度将下降 37.5%;当充填物为水时(取 $V=1500$ m/s)速度将下降 10%;当充填物为油时(取 $V=1200$ m/s),则速度将下降 12.7%;当充填物为泥质时(取 $V=4700$ m/s),则速度下降 1.2%。当灰岩中裂缝孔洞发育时,孔隙度增大,则相应的

速度降低幅度也将增大。

1.4 约束测井反演

这种方法就是利用井旁地震道内插出一个地震数据体, 将内插地震数据体与实测地震数据体相对比, 然后改变每一个样点的权系数值, 直到内插的数据体与实测数据体的误差满足精度要求, 从而求出一个权系数体, 再利用已知井的结果, 通过权系数控制得到内插、外推的各种结果, 如波阻抗、孔隙度、含水饱和度等。这种方法较适用于开发阶段, 它一般要求 100 km^2 的面积要有 10 口以上钻井, 且均匀分布。如果区内钻井少, 分布很不均匀时, 其精度将大受影响。

1.5 神经网络与模式识别

神经网络与模式识别是利用地震资料直接检测油气的方法手段, 是对前面几种方法的一种补充。利用已知油气井和干井井旁地震道, 提取特征信息, 建立判别函数, 对未知样本判别其含油气性。塔北由于目的层埋藏较深、地震信息较弱、储层横向非均质性严重, 在特征参数、样本选择、时窗选择上作了大量试验应用研究, 在油气直接检测方面取

得了一定效果。

1.6 多参数综合分析

采用直方图、二维交会图、三维交会图等多参数聚类分析技术, 对多种地球物理参数进行综合分析评价, 可以提高碳酸盐岩储层预测的精度, 避免单一地球物理参数的局限性和多解性。

直方图分析技术是利用直方图分析各种地球物理参数(例如: 振幅、波阻抗、相干值等)的分布范围, 对比实钻资料, 确定碳酸盐岩储层发育段的参数分布范围和门槛值。二维、三维交会图分析技术, 则是利用直方图分析确定的门槛值, 综合两种或三种有利的地球物理参数范围预测碳酸盐岩储层的有利区分布范围。

2 应用实例及效果

2.1 古地貌

利用三维地震的层拉平技术, 将牧场北工区奥陶系顶面 t_0 图沿双峰灰岩顶面拉平, 并用三维可视化技术对该拉平的层面进行立体显示(图 2), 该图基本反映了该区古岩溶时期的古地貌特征。

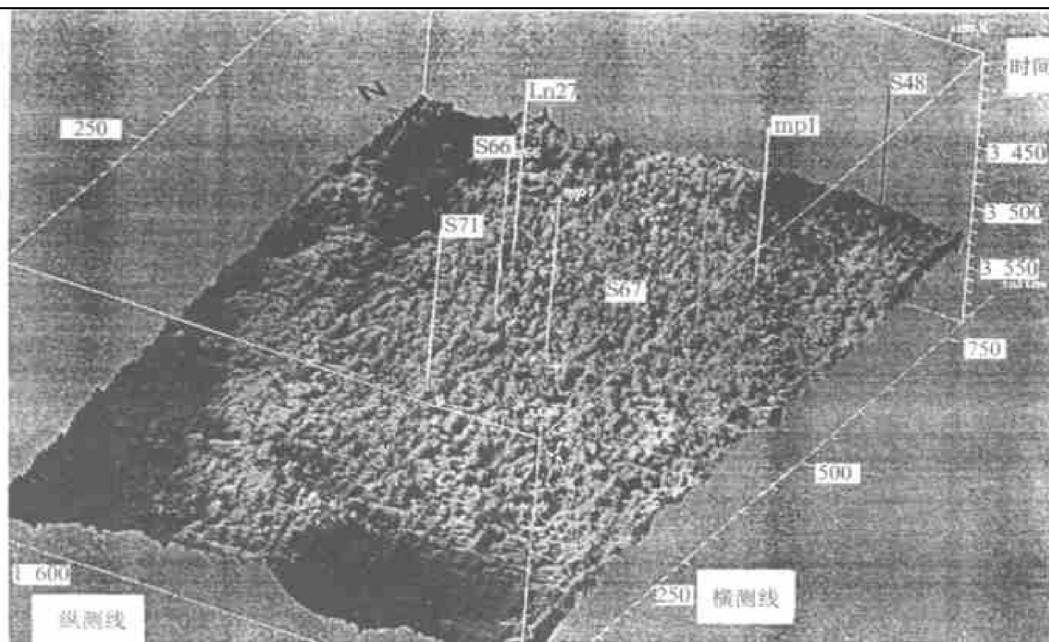


图2 牧场北三维工区古地貌立体显示图

Fig. 2 Steroscopic display of fossil landform in MCB 3-D area from north of Muchang

从阿克库勒凸起奥陶系碳酸盐岩岩溶地貌上分析, 牧场北地区位于岩溶斜坡带的残丘上, 牧场北工区正处于 Ln27 井所处的岩溶残丘一带。从图上可以看出牧场北工区的岩溶残丘并非一个, 而是岩溶残丘的群体, 与桂林现代峰丛、峰林岩溶地貌极为相似。

通过牧场北地区古岩溶地貌综合分析, 得出如

下结论。

(1) 牧场北古地貌东高西低, 与现今构造形态相似。

(2) 牧场北古地貌岩溶残丘可以分为 3 级。S48 井区(塔河 4 号油田)为 I 级残丘; Ln27 - S66 井区 S67 井区残丘为 II 级残丘; Ln27 井 - S66 井西北部残丘为 II 级残丘。各残丘带之间有溶蚀沟, 工

区北、西北、西南部位均处于较低洼的部位。

(3) 从本区溶沟的展布方位推断本区裂缝(节理)主要发育两组, 一组为 NE 向, 一组为 NW 向, 这种发育模式可能与本区位于阿克库木构造带和阿克库勒构造带的交汇部位有关。

(4) 钻获工业油气流的 S48, T401, T402, TK408 井均处于古地貌较高的残丘上, 显示较好的钻井 S66, S67, S65 井也位于岩溶残丘的高部位或岩溶残丘的斜坡部位。

(5) 根据上述古地貌分析, 预测本区碳酸盐岩储层的有利发育带为: 第 1 类有利区为 S48 井区的Ⅰ级残丘; 第 2 类有利区为 Ln27 - S66, S67 井区的Ⅱ级残丘; 第 3 类有利区为 Ln27 - S66 井西的Ⅱ级残丘。

经验证, 位于第 2 类有利区的 S71 井钻井虽获工业油气流, 但比位于第 1 类有利区的 S48 井区的产能低, 证实我们的预测是正确的。

2.2 古水系

利用地震数据和钻井、测井成果对艾协克工区塔河 3 4 号油田区的古水系进行了研究。

首先将艾协克三维工区的地震数据体沿双峰灰岩顶面 T_5^6 地震反射波进行层拉平处理。再将拉平后的三维数据体加载到三维可视化软件中, 然后通过调整振幅属性, 沿拉平后的双峰灰岩顶面向下分析, 在奥陶系顶面附近, 黑色振幅连接成树枝状, 类似水系的展布(图 3); 在奥陶系顶面以下约 150 m 左右, 观察到一组黑色振幅连成树枝状, 也类似水系的展布。根据钻井资料 S64 井在奥陶系风化面附近钻遇角砾灰岩, 代表着溶沟充填物沉积, S61 井在奥陶系顶面以下 198.4 m 处放空 1.29 m, 钻遇溶洞, S64 井、S61 井又正好处于树枝状黑色振幅连线附近, 所以树枝状的振幅分布, 很有可能是古水系的地震反映。

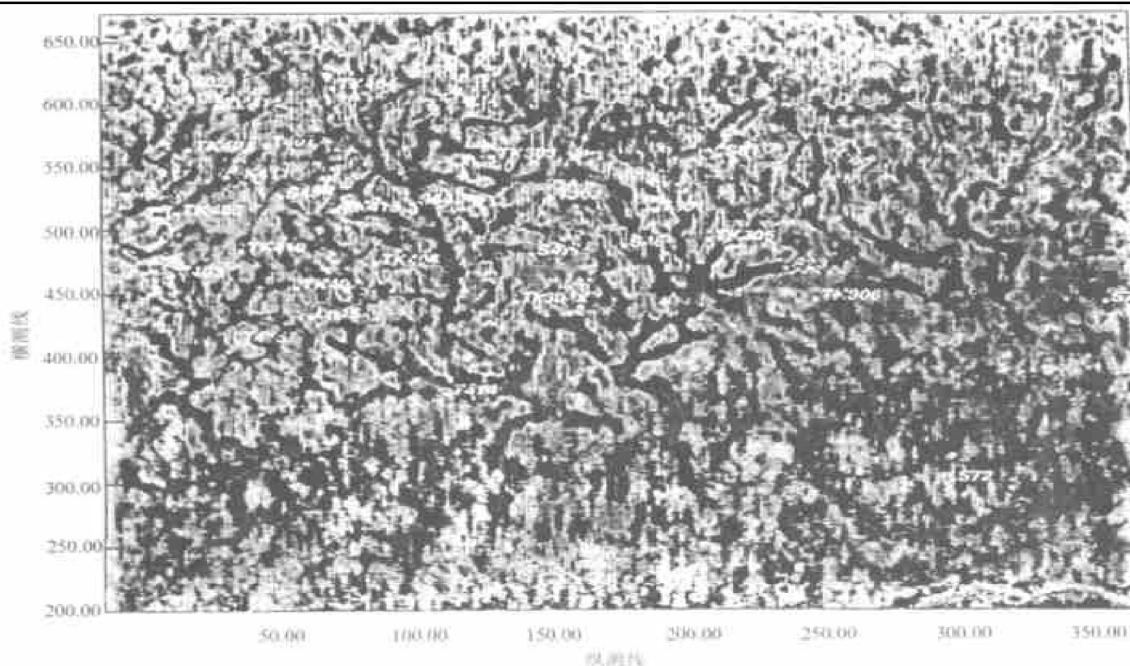


图 3 艾协克三维工区奥陶系顶面附近(3 448 ms)地震切片图(层拉平后)

Fig. 3 Seismic slice near the top of Ordovician (3 448 ms) in IXK 3-D area (after horizon flattening)

对靠近奥陶系顶部的地表水系和奥陶系内部的地下水系发育情况进行了分析, 塔河 3 4 号油区古水系发育具有以下特征。

(1) 奥陶系顶面古构造上呈现北高南低的格局, 水系较发育, 水由北向南流。

(2) 主要发育 4 组水系, 以中间的两组水系为主。地表及地下水系均呈树枝状分布。除主干河道外, 还有许多分支河道, 分支河道向下游逐渐汇聚。

(3) 地表与地下水系有很强的相关性, 且地表

水系较地下水系发育。

(4) 南部各水系汇聚成主干河道, 分支河道不发育, 与本区中上奥陶统覆盖地区相吻合, 地表及地下水系主要发育在中上奥陶统缺失区。中、上奥陶统尖灭线附近, 为海水、淡水交汇地区, 是混合岩溶的有利发育区。

(5) 古水系的发育与本区 SN, NE, NW 向 3 组断裂、裂缝发育有关。

(6) 对比塔河 3 4 号油田地表及地下水系, 可以看出塔河 4 号油田区分支河道多于塔河 3 号油田区。

(7)从本区已完钻井的油气产出情况与地表、地下水系的发育状况分析,处于多支分支河道交汇处的钻井,如S48井有较高的油气产能。而水系不发育的地区油气产出也较少,甚至没有产出,如TK303井。

利用地震资料进行古水系研究,为古岩溶发育研究提供了基础数据。分析认为,分支河道交会地区是岩溶洞穴发育的有利区域,主干河道和分支河道不发育的地区为储层发育的不利地区。这种方法为地下河、溶洞的展布研究及塔河油区储层地质模式的建立提供了可靠的地质依据。

2.3 储层预测

2.3.1 反演波阻抗

为进一步研究艾协克三维工区奥陶系碳酸盐岩储层的横向变化规律,利用该区三维地震保幅数据体和工区内已完钻的T401,T402,TK405,TK406,S46,S47,T302,TK303,S61,S62等10口钻井的测井资料,进行了测井约束的地震反演。

图4为预测井TK407井波阻抗反演剖面,钻井揭示TK407井的油气层主要集中在5 391.5~5 478 m,即风化面以下80 m范围以内(约30 ms)。与波阻抗剖面上的奥陶系风化面以下33 ms内的低波阻抗相对应,吻合很好。

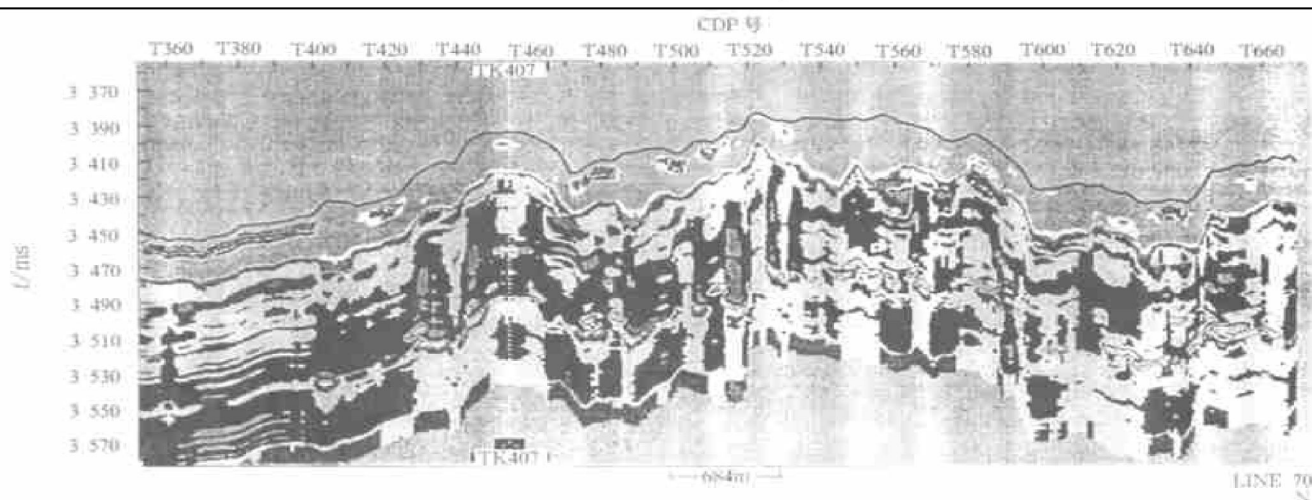


图4 过TK407井波阻抗反演剖面

Fig.4 Section of impedance inversion across TK407 Well

利用上述方法对区内钻井逐个分析,约束井的吻合率约为70%~80%,检验、预测井成功率为60%~76%。

2.3.2 振幅参数

为更客观地分析振幅属性参数,我们选用井周围约50 m范围内的振幅平均值,作为该井附近的振幅值。分析振幅值与相应油气储层的关系,确定振幅门槛值。通过分析奥陶系顶面以下20 ms时窗内各参数平均值,艾协克工区振幅门槛值为2 400,艾协克北工区为7 000,牧场北工区为7 400(振幅为相对值,无量纲)。经预测井TK407、TK408等钻井钻探证明该参数预测的成功率约为68%~80%。

2.3.3 相干参数

按照与振幅参数相同的分析方法,确定奥陶系顶面以下约20 ms时窗以内的门槛值为:艾协克北三维相关门槛值为9.05%(相对值),艾协克工区门槛值为33%(相对值),牧场北门槛值为95%(相

对值),这些值不同是由于各工区数据没有做归一化处理。经TK407、TK408等井钻探证实,相干参数在各工区有较高的成功率。

2.4 含油气性预测

为了能够在有利储集层分布区,进一步判别储集空间内的含油气性和间接判别充填物性质,对塔河地区碳酸盐岩储层进行了模式识别油气预测,取得了一定效果。

在牧场北工区利用S48,T401井作为油井样本,LN27井作为干井样本,进行了模式识别处理。本次模式识别所选用的时窗为36 ms,特征参数主要选择伯格谱、自相关、自回归模型参数。如图5为预测井S71井模式识别油气预测异常剖面图,由图分析S71井可望钻获工业油气流,后经实钻证实预测是正确的。

2.5 多参数综合分析

2.5.1 直方图

利用直方图分析技术对所求取的各项沿层的

地震参数,比如沿层的振幅、相干值、波阻抗、模式识别异常、频率异常等进行量化分析。

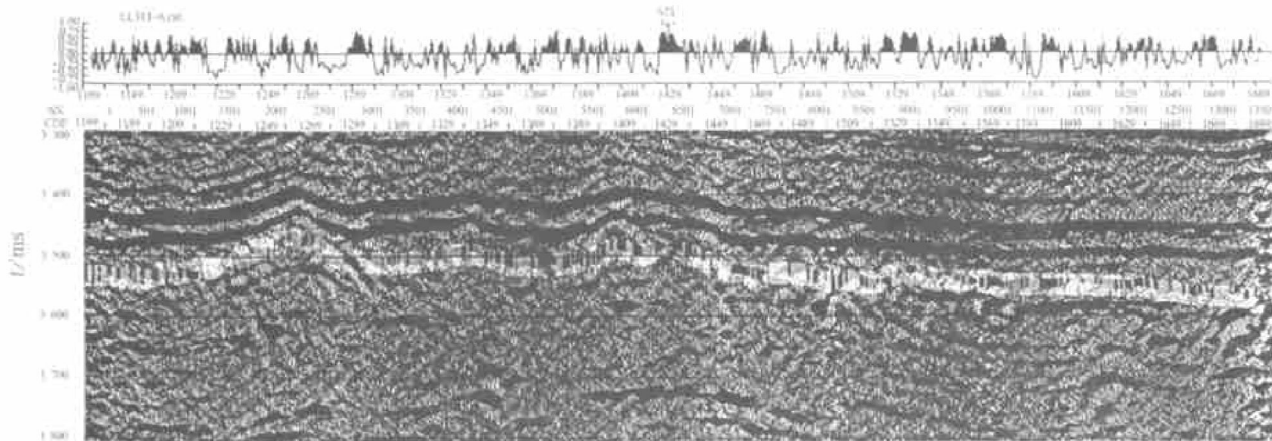


图 5 过 S71 井模式识别异常剖面图

Fig. 5 Section of pattern recognition anomalies across S71 Well

以艾协克北奥陶系顶面以下 20 ms 时窗内的平均波阻抗分析为例,通过平均波阻抗的直方图分析可知,该区沿层平均波阻抗值主要集中在 11 000 到 14 500 之间(数值为相对值,无量纲)。综合分析实钻井油气储层与波阻抗之间的关系,确定门槛值为 12 800,将低于 12 800 的波阻抗分布的范围展布在平面图上,根据具体情况调整波阻抗值的选择范围,使预测区域中已知钻井的吻合率达到 70% 以上,这时就可以对有利储层的预测分布范围进行外推。

2.5.2 二维交会图

利用二维交会的方式,将沿层任意两种地球物理参数进行分析,比如对牧场北三维工区奥陶系顶面以下 20 ms 时窗内的平均相干值、振幅、波阻抗等进行两两交会,从而分析各参数间的关系以及两种参数与储层的关系。选择弱振幅、弱相干的参数,通过 RAVE 的发射功能,就可以将所选中的两种参数的有利分布范围展布到平面图上,调整两种参数范围,就可以分析有利储层的平面展布范围。

2.5.3 三维交会图

三维交会图是利用 3 种参数进行交会分析的技术,如图 6 为艾协克工区奥陶系顶面以下 20 ms 平均相干、波阻抗、振幅的三维交会图,图中黑区为选择的弱相干、弱振幅、低波阻抗的有利参数区,利

用 RAVE 的功能就可以直接将有利参数所代表的储层有利分布范围展布到平面图上。利用这种方法可以综合 3 种参数进行评价分析,确定有利储集体的分布,减少单个参数的局限性。

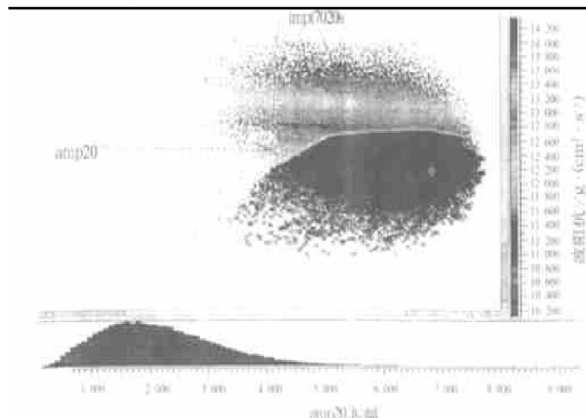


图 6 艾协克三维工区平均相干、振幅、波阻抗三维交会图

Fig. 6 3-D cross plot of average coherent coefficient, amplitude, impedance in IXK area

总之,上述分析方法技术为参数的量化分析和多参数综合分析提供了可靠的技术手段。

参 考 文 献

- 1 詹姆斯 N P,肖凯 P W. 古岩溶[M]. 胡文海,胡征钦译. 北京:石油工业出版社,1992

(下转第 44 页)