



的铜电缆连接到大功率发电机供电。两分量接收机布设在离发射源几公里到 10km 的地方。在观测站,由正交电磁传感器记录平行于 AB 的水平电场 ( $E_x$ )和垂直磁场 ( $H_z$ )。电采集站和磁采集站间距均为约 200m。

在野外进行时频电磁法勘探可将时间域和频率域方法统一进行,即采集工作一次完成,室内分别处理获得时域和频域数据。该方法的布极可以采用目前人工源已有的多种布极方式,测量的信号也可以根据勘探目标选择(一般测量水平电场  $E_x$  和垂直磁场  $H_z$ )。但工作时要特别注意的是:激发波形采用一系列不同周期(或频率)的方波,接收探头要求高采样率连续记录,并在室内通过对不同周期的信号进行分频处理(如 CSAMT),获得频率测深曲线;对长周期信号进行处理(如同 LOTEM),获得多组激发衰减曲线。

通过室内处理获得频率域和时间域信号,对垂直磁场时域信号进行反演获得电阻率成像;对频率域电场信号进行极化异常提取。研究极化异常时我们引入极化效应的 Cole-Cole 模型,即

$$\rho_s(i\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - \eta \left[ 1 - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^c} \right] \right\} \quad (1)$$

式中: $\rho_s(i\omega)$ 为电阻率,; $\rho_0$ 为频率为零的岩石的电阻率; $\eta$ 为充电率; $\tau$ 为时间常数; $c$ 为表征复电阻率变化程度的参数; $\omega$ 为角频率; $i$ 为时间参数。极化率异常的提取主要采用约束反演,首先利用已知信息(如地震及电测井信息),进行二维反演成像,再在已经获得电阻率成像的基础上,对电阻率约束,反演极化率或充电率以及时间常数和频率相关系数。

在该方法中还采用双频相位来表征激发极化相位差信息

$$\Delta\varphi_{\phi_n} = \frac{\omega_2\varphi(\omega_1) - \omega_1\varphi(\omega_2)}{\omega_2 - \omega_1} \quad (2)$$

式中  $\varphi(\omega_2)$ 和  $\varphi(\omega_1)$ 是当频率为  $\omega_1$ 和  $\omega_2$ 时场源电场的绝对相移。已有的实践证明,在油气勘探中只有电阻率和极化相位异常都为正常时推断为含油气异常的可能性才是最大。

### 3 资料处理与异常特征分析

#### 3.1 资料处理

时频电磁法勘探资料处理包括时间域和频率域处理,主要工作流程如下:

- (1)数据录入和数据格式转换;
- (2)剖面数据的形成及浏览;
- (3)时域电磁野外数据的分析;
- (4)时域信号的滤波和叠加;
- (5)发射信号及系统响应反褶积;
- (6)加载测量信息形成剖面数据库;
- (7)频率域和时间信号按剖面形成数据库文件;
- (8)把时间域数据转换成地电剖面的总参数;
- (9)对时间剖面进行剖面分析,进行二维反演;
- (10)提取频率域的数据极化信息;
- (11)综合评价。

时间域资料处理主要分为预处理、求取综合地电参数、电阻率反演以及最优化分层等几个阶段。

频率域资料处理可以划分为三个大的步骤,一是数据预处理,二是异常信息提取,三是激发极化信息反演。

#### 3.2 油气藏异常模式

油气成藏后会引引起储集层周围及其上方介质物理、化学和其他响应的异常,特别是电性、电化异常。油气藏表现为在正常地层中的一个电阻率局部异常体,也是一个极化率的局部异常体,值得注意的是,在油气藏分布范围内及上覆地层电性的局部异常也可能由其他一些原因引起,如:

- (1)储集岩岩石物理性质的变化;
- (2)地下水矿化度(油气藏的接触带附近矿化度突然增高);
- (3)油气藏的直接影 响,因为它是局部高阻目标;
- (4)在流体运移作用下围岩物理性质的改变,例如生成方解石晕和黄铁矿晕;
- (5)在油藏及其邻近区域存在静电系统。

因此,在油气藏周围不仅有高电导率,还在上方存在方解石化和次生黄铁化晕,特别是油水界面上孔隙空间双电层的激发极化强异常。圈闭含油与否所引起的极化率值差别非常明显,电阻率值、时间常数和频率相关系数对于储层孔隙度、渗透率以及温度的变化也相当灵敏。图 2 是 N 井段电阻率与储层孔隙度、渗透率和饱和度相对关系图,从中不难看出这种对应关系。

岩石空间结构、油气的饱和度和矿化水的组成等会影响储集层的物理特性,油气藏在层状断面的正常场背景上会产生局部的电阻率和极化率异常。

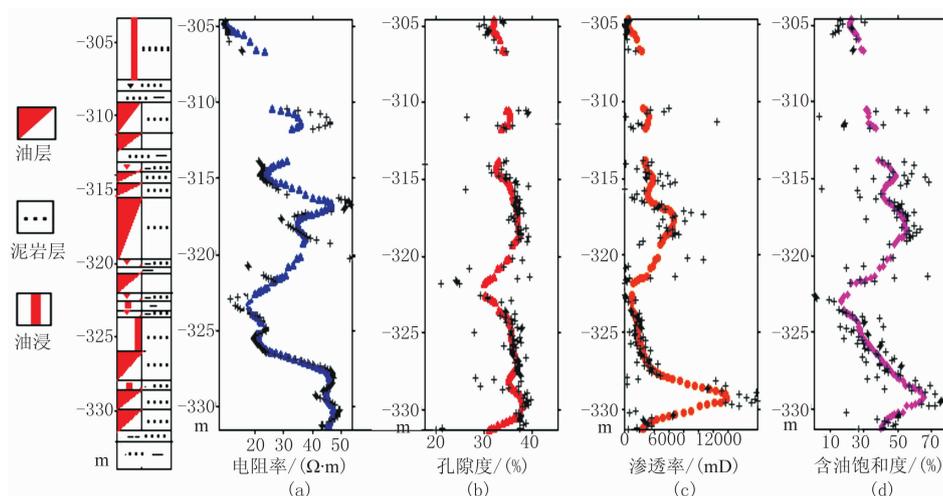


图 2 N 井段电阻率(a)与储层孔隙度(b)、渗透率(c)和饱和度(d)相对关系图

### 3.3 异常分析

经过时间域和频率域资料处理,得到了以下几种异常信息:视极化率异常、频率相关系数异常、时间常数异常、电阻率异常、双频相位异常。将上述异常数据与工区已知钻井资料相结合,再采用神经网络技术,综合分析以上异常信息,即可得出全区各条测线的神经网络预测结果。

## 4 综合解释

储层的极化异常反映储层内流体赋存情况,流体越丰富,极化异常也越强。鉴于油气田上方由于固液界面与油水(或气水)界面之间存在双电层,产生充放电效应,形成极高化异常现象,而流体对固体物质的溶解能力形成极化差异,无流体则无极化异常。但是例外的情况是在近地表氧化还原环境下产生的侵染状矿物,如硫化铁等却是强极化物质,一般在较深的储层位置很难形成这类强极化物质。通过时频电磁法可以提取多种参数反映油气异常特征,与油气直接相关的 5 个参数分别为:极化参数、频率相关系数、时间常数、相位异常、振幅异常;另外,还可提取反映电性特征的电性异常、电阻率,并且针对电阻率进行最优化分层解释。根据上述多参数利用模糊评价及神经网络预测技术,分别得到综合异常剖面及神经网络预测剖面。

通过多参数油气电性异常提取技术的运用,分别提取深度域和频率域的参数异常,即:深度域的极化参数异常、时间常数异常和频率相关系数;频率域

的相位异常与振幅异常;同时反演得到电性异常曲线、电阻率剖面。根据上述多参数利用模糊评价及神经网络预测技术,分别得到综合异常剖面及神经网络预测剖面。每种参数的物理含义以及在油气识别中的作用各不相同,从不同的侧面反映了地下地质体的含油气特征和电性结构。其中极化参数与含油气饱和度相关,含油气性能评价主要依据该参数进行。通常在油气相对富集的情况下,频率相关系数与渗透率相关,时间常数与孔隙度相关,而相位异常与极化参数相对应,振幅异常则与电阻率相对应。

为了对提取的激发极化异常参数的地质层位正确定位,需对异常的成因进行分析,进行了电阻率剖面反演,先对电阻率剖面进行最优化分层,再利用电性特征与地震剖面对电阻率剖面进行标定追层。

对上述综合解释结果进行综合评价可按如下程序进行:

(1)综合评价原则 以极化参数为主,以频率相关系数、时间常数、双频相位异常平面分布、振幅异常分布为辅,参照电阻率、地震属性、地震构造等多参数进行综合评价。

(2)分级标准 以过 A-2 井(获工业油气流)与 B-1 井(油气显示)的 05 线为例制定标准,如图 3 所示。通过对过 05 线的 A-2 和 B-1 分析发现,一级有利区的各参数异常值范围分别为:极化参数(0.62, 1),频率相关系数(0.75, 1),时间常数(0.75, 1)。二级有利区的各参数的异常值范围分别为:极化参数(0.6, 0.62),频率相关系数(0.72, 0.75),时间常数

(0.72, 0.75)。三级有利区的各参数的异常值范围分别为:极化参数(0.58, 0.6), 频率相关系数(0.7, 0.72), 时间常数(0.7, 0.72)。

(3)综合评价 根据上述加权平均方法得到综合异常平面分布图(图4)和神经网络预测异常三维显示图(图3)与多个含油气极化参数的异常强

度和剖面及平面异常特征,综合考虑所属构造单元、地震构造的发育情况、极化参数异常的构成及分布规模以及钻井揭示的油气显示情况等,将全区含油气极化参数异常评价为三类。根据分布的位置推断深凹槽或靠近深凹槽的掀斜断块(包括断凸)构造或岩性储集体是形成油气藏的主要场所,为I类含油气最有利区,共有异常16个,其中11个异常分布在D构造的深凹槽中;II类为含油气较有利异常5个;III类为含油气有利异常共5个。具体异常分类见表1。

表1 含油气圈闭极化参数异常评价表

评价序列	异常构造名称	极化率异常强度	油气显示情况	评价类别
1	Imari-E	0.58~0.70	出油井	I
2	Agadi-2	0.58~0.66	出油井	I
3	Imari-W	0.58~0.64	干井	I
4	Imari-S	0.58~0.66		I
5	Helit	0.58~0.66	干井	I
6	Arianga	0.58~0.64	出油井	I
7	Moul-1-E	0.58~0.66		I
8	Madama-N	0.58~0.66	北600m显示井	I
9	Ourtinga	0.58~0.66	出油井	I
10	Ourami-E	0.58~0.64	待钻井	I
11	Gani-1	0.58~0.64	出油井	I
12	Gouria-1	0.58~0.64		I
13	Dibeilla	0.58~0.62	出油井	I
14	Agadi-E	0.58~0.62	出油井	I
15	Achigore-2	0.58~0.62		I
16	Madama-NW	0.58~0.62	南部边缘气测显示井	I
17	Yogou-1	0.58~0.6	出油井	II
18	Boujamah-SW	0.58~0.62		II
19	Dibeilla-S	0.58~0.6	出油井	II
20	Admer-N	0.58~0.62	出油井	II
21	Gani-NW	0.58~0.6		II
22	Boujamah-1	0.58	显示井	III
25	Fana	0.58~0.6	出油井	III
24	Achigore-1	0.58		III
25	Ourtinga-W	0.58		III
26	Ourami-N	0.56		III

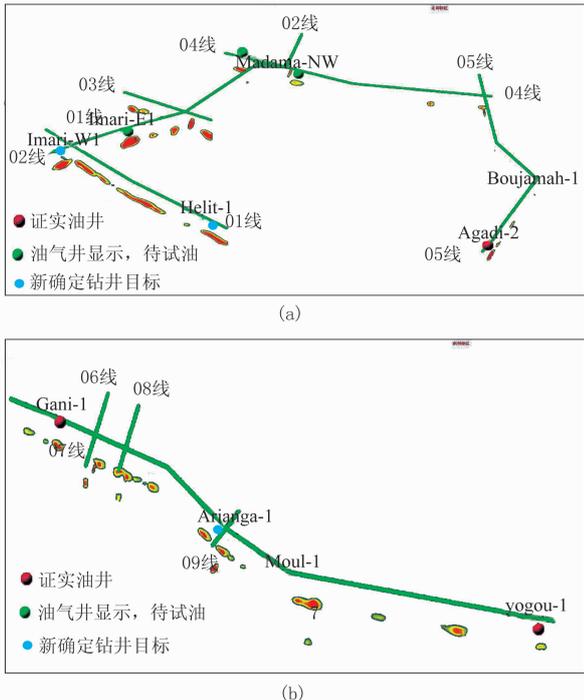


图3 时频电磁法勘探神经网络预测三维显示图 (a)北部探区;(b)南部探区

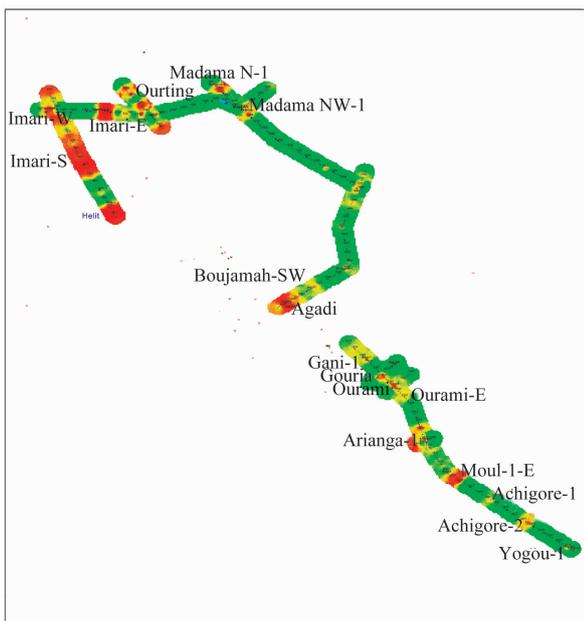


图4 时频电磁法勘探综合异常平面图

综合评价结果并结合构造分析,对于北部含油气有利异常 Imari E 和 Ourtinga 和中部的 Agadi E 和 Dibeilla 等含油气有利异常实施钻探,均获得工业油流,取得了好的勘探效果,有效地降低了勘探早期的勘探风险。

## 5 结论

通过对全区 9 条剖面的 3 个深度域的油气异常参数(极化参数、频率相关系数、时间常数)的剖面与平面分析,以及对频率域的双频相位异常与振幅异常的分析,得出以下结论:

(1)该区地层介质纵向电性差异明显、电性结构清楚,储油目的层埋藏浅(约 2km)、为碎屑岩(砂岩)储层,地层介质中流体(油气藏)极化效应明显;该区地电条件有利于开展时频电磁法(TFEM)油气检测工作;一些极化率异常分布于断块构造的翼部斜坡部位,少数构造对应极化率异常不连续,推测油气藏受构造和岩性(砂体)双重因素控制。

(2)根据异常强度划分为三类:Ⅰ类含油气最有利异常 16 个,Ⅱ类含油气较有利异常 5 个,Ⅲ类含油气有利异常 5 个。

(3)在一些待钻井、未钻井或已钻显示井附近强异常区的有利目标上方极化率等含油气参数均具有较强异常,为含油气有利构造。经钻探证实北部的

Imari E 和 Ourtinga 以及中部的 Agadi E 和 Dibeilla 等 4 个为含油气有利构造。

### 参考文献

- [1] 何展翔. 人工源时频电磁测深系统. 第十八届地球物理年会议论文, 2002
- [2] 严伦等. 构造与油气圈闭. 北京: 石油工业出版社, 1995
- [3] 陈乐寿等. 大地电磁测深资料处理与解释. 北京: 石油工业出版社, 1989
- [4] CNPC Niger Petroleum S A. Geophysical and geological study services of block agadem. Niger, July, 2009
- [5] Morley C K, Nelson R A et al. Transfer zones in the East African rift system and their relevance to hydrocarbon exploration in rifts. AAPG, 1990, 74(8): 1234~1253
- [6] Cross T A, Correlation strategies and methods in continental strata, Middle Magdalena Basin, Colombia. *Ciencia, Tecnologia Y Futuro*, 2000, 1(3): 678~690
- [7] Cross T A, Lessenger M A. *Sediment Volume Partitioning: Rationale for Stratigraphic Model Evaluation and High-resolution Stratigraphic Correlation*. Accepted for publication in Norwegian Petroleum- Foreigning Conference Volume, 1996

(本文编辑:冯杏芝)

(上接第 139 页)

含量和孔隙结构,目的是为了简化复杂的岩性分类,以便依据测井资料即可有效区分岩性,并为储层测井评价服务。该区  $N_2^3$ 、 $N_2^2$  地层岩性可划分为泥岩、砂岩和碳酸盐岩三大类。

(3)  $N_2^3$ 、 $N_2^2$  混积岩不同岩性(测井分类)的骨架值、孔隙结构、含油性和测井响应等均存在一定差异,因此不同岩性(测井分类)的储层参数计算模型及其参数也各不相同。

### 参考文献

- [1] Mount J F. Mixing of siliciclastics and carbonate sediments in shallow shelf environments. *Geology*, 1984, 12(7): 432~435
- [2] 杨朝青,沙庆安. 云南曲靖中泥盆统曲靖组的沉积环境:一种陆源碎屑与海相碳酸盐的混合作用. *沉积学报*, 1990, 8(2): 59~65  
Yang Chaoqing, Sha Qing'an. Sedimentary environment of the middle Devonian Qujing formation, Qujing, Yunnan province: a kind of mixing sedimentation of terrigenous clastics and carbonate. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1990, 8(2): 59~65
- [3] 沙庆安. 混积岩一例——滇东震旦系陡山沱组砂质砂屑白云岩的成因. *古地理学报*, 2001, 4(3): 56~61  
Sha Qing'an. An example of hunji rock—origin of

sandy dolarenite of the sinian Doushantuo formation in eastern Yunnan province. *Journal of Palaeogeography*, 2001, 4(3): 56~6

- [4] 王国忠. 南海北部大陆架现代礁源碳酸盐与陆源碎屑的混合沉积作用. *古地理学报*, 2001, 3(2): 47~54  
Wang Guozhong. Mixed sedimentation of recent reefoid carbonates and terrigenous clastics in the north continental shelf of the South China Sea. *Journal of Palaeogeography*, 2001, 3(2): 47~54
- [5] 马艳萍,刘立. 大港滩海区第三系湖相混积岩的成因与成岩作用特征. *沉积学报*, 2003, 21(4): 607~613  
Ma Yanping, Liu Li. Sedimentary and diagenetic characteristics of paleogene lacustrine "Hunji" rock in Beach district, Dagang. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(4): 607~613
- [6] 董桂玉,何幼斌,陈洪德等. 惠民凹陷沙一中湖相碳酸盐与陆源碎屑混合沉积——以山东商河地区为例. *沉积学报*, 2007, 25(3): 343~350  
Dong Guiyu, He Youbin, Chen Hongde et al. Mixed sedimentation of carbonates of lagoonal facies and terrigenous clastics of the middle submember of Member 1 of Shahejie Formation in Huimin Sag; taking Shanghe area in Shandong province for an example. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(3): 343~350
- [7] 张雄华. 混积岩的分类和成因. *地质科技情报*, 2000, 19(4): 59~65  
Zhang Xionghua. Classification and origin of mixed sedimentite. *Geological Science and Technology Information*, 2000, 19(4): 59~65

(本文编辑:朱汉东)