

# TFEM 探测 JZ 地区潜山内幕目标的模拟及试验

高妍\*<sup>①</sup> 沈金松<sup>①</sup> 何展翔<sup>②</sup> 金凤鸣<sup>③</sup> 曹杨<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院,北京 102249; <sup>②</sup>东方地球物理公司,河北涿州 072750; <sup>③</sup>中国石油华北油田分公司,河北任丘 062550)

高妍,沈金松,何展翔,金凤鸣,曹杨. TFEM 探测 JZ 地区潜山内幕目标的模拟及试验. 石油地球物理勘探, 2015, 50(6): 1207-1212.

**摘要** 针对 JZ 地区的潜山内幕油气勘探目标,探讨时频电磁法探测的有效性。根据该区已知资料建立地质模型,开展目标体位于不同构造位置、具有不同规模以及与围岩电阻率存在不同差异等情况下的正演模拟,得到其电场水平分量振幅曲线及去除背景场后的纯电场水平分量振幅断面图。对结果进行分析,了解了潜山内幕目标产生的电磁异常规律;与实测结果进行比较,讨论了探测内幕目标的可行性。野外试验结果证实,使用时频电磁法能够有效探测到潜山内幕含油气目标。

**关键词** JZ 地区 古潜山 电磁法 可行性

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.06.023

## 1 引言

潜山内幕油气藏一直是 JZ 地区的重要勘探领域<sup>[1]</sup>。但潜山内幕成藏条件复杂,圈闭类型不清,在地震剖面上主要为一套丘状结构的反射,甚至无反射<sup>[2]</sup>。因此,圈闭的发现、落实和成藏评价都难度很大,阻碍了该区勘探开发进程<sup>[3,4]</sup>。时频电磁法(TFEM; time-frequency electromagnetic)是近年来在国内外广泛应用的烃类检测新技术<sup>[4,5]</sup>。该方法主要通过识别和评价圈闭目标的电阻率和极化率异常直接检测是否含油气。当圈闭含油气时其上方呈现相对高阻、高极化特征,应用时频电磁法能够有效评价圈闭目标含油气性,优选有利圈闭。自 2004 年以来,该方法开始应用于油气检测和评价,至今在国内十多个盆地的五十多个区块取得了好的效果,并在海外沙特、阿曼、尼日尔等地区应用<sup>[6,7]</sup>,主要为碎屑岩目标,但对类似 JZ 地区的海相碳酸盐岩潜山内幕评价却鲜有报道。海相碳酸盐岩油气藏与碎屑

岩油气藏具有完全不同的电性特征,碳酸盐岩一般为高阻,但碳酸盐岩缝洞含油后,其电阻率比高阻碳酸盐岩围岩低,所以研究利用时频电磁方法探测潜山内幕油气目标的可行性和开展针对已知潜山油气藏目标的试验,探索潜山内幕油气圈闭目标评价检测思路具有重要意义和价值。本文根据已知的实际资料建立地质模型,将所需模拟的目标体分别放置于不同构造位置,使其具有不同规模,以及在与围岩电阻率差异不同的情况下对其进行正演模拟。并将得到的结果与实测的结果进行比较,证实可用 TFEM 探测潜山内幕目标。

## 2 方法及模型

时频电磁法采用长直导线源(AB)激发,AB 距通常为几公里到十公里,在偏离激发源 AB 一定远处布设电磁场接收站,偏移距为几公里到十几公里,测量水平电场( $E_x$ )和垂直磁场( $H_z$ ),有时也测量水平磁场( $H_y$ )。本文计算使用的采集装置 AB 距为

\* 北京市昌平区府学路 18 号中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院,102249. Email:highy@163.com

本文于 2013 年 11 月 4 日收到,最终修改稿于 2015 年 10 月 20 日收到。

本研究受国家自然科学基金联合基金项目“基于地震电磁属性的页岩气储层预测与监测方法研究(U1262206)”资助。

10km, 电流为 50A, 接收点距为 200m, 偏移距为 10km, 即研究目标位于场源 AB 垂直平分线 10km 远处(图 1)。

根据研究区的地质特征和地震资料建立了如图 1 所示的三维地质模型进行正演模拟, 采用 Zhdanov 等<sup>[8]</sup>针对复杂背景的积分方程三维频率域模拟方法软件。主要步骤如下: 首先根据地震深度偏移剖面 and 电测井资料建立分层电阻率三维背景模型 M; 然后进行正演计算, 获得模型的电磁响应, 即电场的振幅  $E_M(f_i)$  和相位  $F_M(f_i)$ ; 再在该三维模型中设置研究目标得到三维模型 R, 对模型 R 进行正演计算, 获得模型 R 的电场振幅  $E_R(f_i)$  和相位  $F_R(f_i)$ , 将模型 M 和模型 R 的正演数据在对数域进行差分处理, 获得差分振幅曲线为

$$E_{di} = \lg(E_M(f_i) - E_R(f_i)) \quad (1)$$

同样, 可得差分相位曲线为

$$F_{di} = F_M(f_i) - F_R(f_i) \quad (2)$$

这样就去除了构造背景, 获得研究目标纯异常响应。对于其他场分量亦可采用相同的方法得到差分曲线, 为简化起见, 本文仅分析电场振幅变化规律。

背景模型 M: 第一层为第四系和新近系, 由左至右减薄, 模型左端最厚处为 2200m, 右端仅为 900m, 电阻率为  $10\Omega \cdot m$ ; 第二至第四层分别为古近系、中生界、上古生界, 其中古近系仅在左段凹陷存在, 往右缺失, 而中生界和上古生界仅在斜坡区局部残存, 电阻率分别为 3, 12,  $21\Omega \cdot m$ ; 第五层为下古生界, 厚度在 1000~2000m 之间, 呈左深右浅分布, 电阻率为  $4000\Omega \cdot m$ ; 第六层为中上元古界, 电阻率为  $10000\Omega \cdot m$ 。图 1 为横向长 44km、深 8km、纵向延伸 100km 的准三维模型。时频电磁测深装置布设: 场源纵向横跨模型, 异常体位于场源正中心距离场源 10km, 测点位于目标正上方, 激发电流为 50A。

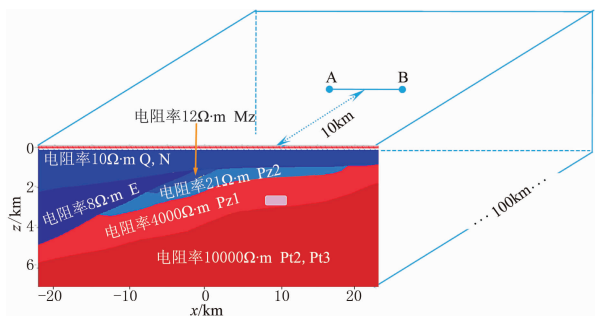


图 1 背景地质模型及时频电磁测深装置示意图

### 3 潜山内幕目标模拟及异常特征

为了充分研究时频电磁法对潜山内幕目标探测的可行性, 下面主要对处于潜山内幕不同构造位置、不同规模以及不同饱和度三个方面进行模拟研究。

#### 3.1 不同构造部位目标的异常特征

处于不同构造位置的勘探目标受上覆地层及构造影响不同, 上覆低阻层比高阻层对电磁场吸收作用更强, 比较难以穿透。对位于不同构造位置, 设计了从凹陷区到斜坡再到隆起区的上覆地层不同厚度、不同电性、深度相同的 4 个目标, 模拟分析采用时频电磁法探测的可行性及有效性。

四个潜山内幕目标在背景潜山地质模型中的位置如图 2 所示: 目标 1, 异常体位于凹陷区, 上覆地层主要为第四系—新近系—古近系; 目标 2, 异常体位于凹陷区和隆起区的过渡带, 上覆地层为第四系—新近系—古近系—上古生界地层; 目标 3, 异常体也位于凹陷区和隆起区的过渡带, 主要位于隆起区, 比模型 2 多了一套中生界残留地层, 但上覆新近系—古近系至潜山顶面地层厚度较薄; 目标 4, 异常体位于隆起区, 主要缺失古近系和中生界地层。

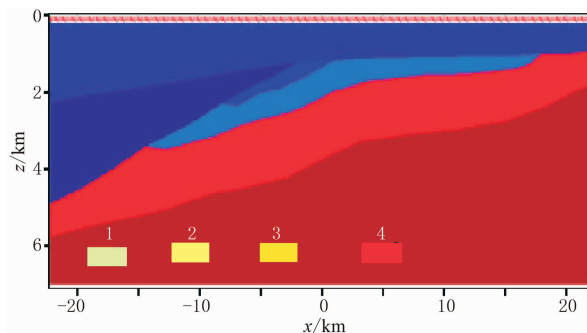


图 2 目标异常体在模型中的位置示意图  
1, 2, 3, 4 分别为目标异常体

根据该区测井资料<sup>[9]</sup>及石油地质资料可知, 潜山内幕含油气目标主要为缝洞含油, 孔隙度一般为 15%, 其电阻率为  $300\Omega \cdot m$ , 异常体的切面积为  $1.5\text{km}^2$ , 走向延伸 100km, 该模型相当于二维模型, 下同。分别计算每个模型目标体上方地面测点的电磁场。图 3 是计算得到的 4 条水平电场振幅  $E(f)^e$  随不同周期  $T$  (频率的倒数) 的变化曲线。基本特征非常清楚, 目标 1 的电场振幅曲线振幅幅度最小, 目标 4 的电场振幅曲线振幅幅度最大。

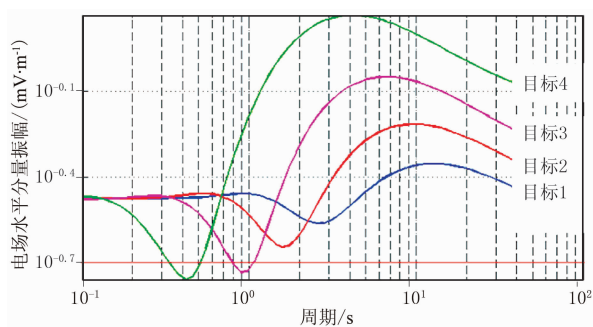


图 3 电场水平分量振幅曲线

目标 1 的电场振幅曲线在频率为  $1/2.7\text{Hz}$  时出现极小值,在  $1/13\text{Hz}$  处出现极大值;目标 2 至目标 4 振幅曲线的极大值和极小值点逐渐移向高频段,目标 4 极小值频率出现在  $1/0.43\text{Hz}$  处,极大值出现在  $1/4\text{Hz}$  处。

由于电磁波的趋肤深度随频率变化,因此,对应于高、低频率的极小值点和极大值点反映的应是相同深度、不同构造位置目标体形成的综合地电断面差异。从目标 1 到目标 4,异常目标体上方的巨厚倾斜低阻层厚度逐渐减小,而高阻薄层的厚度逐渐增加,上覆电性层的纵向电导越来越小,导致目标 1 到目标 4 的极大值和极小值点由低频段逐渐移向高频段,位移值达一倍以上。可见隆起区和凹陷区需要采用不同的激发频带,凹陷区需要采用相对较低的激发频带或者相对较宽的激发方波周期。

那么用时频电磁法能否探测到这些深层目标呢?下面以 JZ 地区的野外典型噪声干扰区的测线背景噪声为基准,计算噪声的幅值范围。

图 4 为 JZ 地区野外某测线背景噪声环境下得到的电场振幅曲线图,可见测线附近存在较多干扰源。测线上大部分测点噪声值在  $0.2\mu\text{V}/\text{m}$  以下,部分测点距离高压线较近噪声较大,以  $350\sim 400$  号点之间干扰最为严重,背景信号幅值达到  $0.7\mu\text{V}/\text{m}$ 。通常取  $0.2\mu\text{V}/\text{m}$  为背景噪声,同时根据人工源信号要大于背景噪声 5 倍的行业技术规范要求,确定当异常场信号值大于  $1\mu\text{V}/\text{m}$  时是可靠的。

应用式(1)计算差分振幅异常,获得纯异常断面如图 5 所示。由图中可见,断面中异常体 1~4 的电场振幅最大值分别为  $1.1, 3.2, 5.0, 12.5\mu\text{V}/\text{m}$ 。

通过对比分析噪声和目标体产生的纯异常可以看出,图 5 中目标 1 的异常信号很微弱,接近背景噪声环境下要求的最小信号强度,在噪声较大的情况

下,该目标体产生的信号难以可靠识别。随着上覆导电层厚度减小,对信号的吸收减小,目标 1 到目标 4 去背景后的电场值断面水平分量振幅异常显示得越来越强。因此,对于目标 1,古近系—新近系覆盖层较厚,若想得到能可靠识别的异常信息,需要加大激发电流达  $50\text{A}$  或以上,或叠加次数增加到大于 25 次,可提高信噪比 5 倍以上,信号幅度达到  $5.5\mu\text{V}/\text{m}$ ,才能得到真实可靠的振幅曲线。

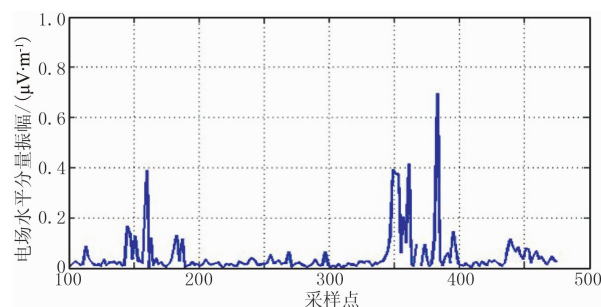


图 4 JZ 地区某野外测线背景噪声场振幅曲线

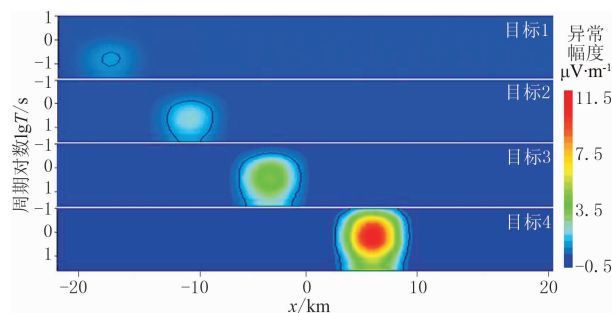


图 5 电场水平分量振幅异常断面图

### 3.2 不同规模目标的异常特征

因 JZ 地区存在多套储盖组合,呈层状成藏模式,而该区潜山储集层在平面上呈条带状分布,发育特征规模不清,因此在背景模型中设计不同规模的目标异常体,模拟与电磁场振幅异常的关系,了解时频电磁法探测某些目标的可能性。基本模型为异常体位于模型水平方向坐标  $5\text{km}$  处(图 1),目标体埋深为  $4\text{km}$ 。设计四个尺寸不同的目标异常体,目标 1~目标 4 异常体切面面积分别为  $0.04, 0.25, 0.50$  和  $1.00\text{km}^2$ ,走向延伸  $100\text{km}$ ,异常体缝洞含油时的电阻率值为  $300\Omega\cdot\text{m}$ 。通过正演模拟,计算 4 个目标异常体的电场水平分量振幅曲线(图 6)。

从图中可见,4 个目标异常体的振幅曲线形态大致相同,目标异常体的切面面积由小到大变化时,振幅曲线极小值有较明显变化,幅值从  $10^{-0.75}\text{mV}/\text{m}$  减小到  $10^{-0.8}\text{mV}/\text{m}$ ,极小值频率向低频段稍偏移。

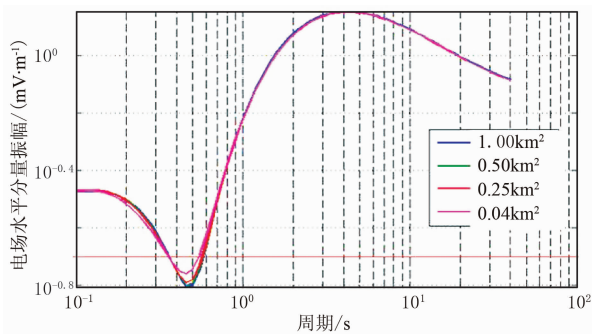


图6 不同尺寸目标异常体电场水平分量振幅曲线

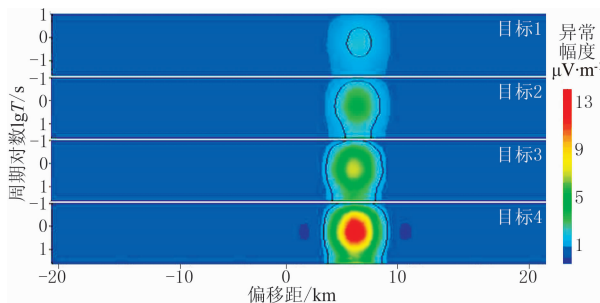


图7 同一构造位置不同规模异常体电场水平分量振幅纯异常断面图

图7是减去背景场后同一构造位置不同规模异常体电场水平分量振幅断面。异常体的电场水平分量振幅由目标异常体1到目标异常体4逐渐增大,说明目标体的切面积越大,引起的异常振幅波动就越大,异常最大值分别为1.8,3.8,7.5,14.0 $\mu\text{V}/\text{m}$ 。可以看出,当异常体的切面积减小至0.04 $\text{km}^2$ 时,信号非常微弱,接近背景噪声环境下要求的最小信号强度;当噪声较大时,该信号难以可靠识别。要想得到该类规模目标体足以可靠识别的异常信息,需要加大激发电流达30A以上或增加叠加次数大于9次,可提高信噪比3倍以上,信号幅度达到4.8 $\mu\text{V}/\text{m}$ 。对目标1,需要加大电流强度至40A以上或提高叠加次数大于10次。

### 3.3 不同含油饱和度目标的异常特征

JZ地区油藏主要为碳酸盐岩岩溶缝洞型油藏,缝洞中分别含油、气和水时所产生的异常不同。建立缝洞中含有不同类型流体模型进行模拟,了解时频电磁法对不同流体类型异常体的识别能力。基本模型为异常体位于模型水平方向坐标5km处(图1),目标体埋深为4km,异常体的切面积为1.5 $\text{km}^2$ 。

设计4个异常体不同电阻率值储层目标,根据该区测井和孔隙度资料,设计目标1为缝洞含水异常体,电阻率值为30 $\Omega\cdot\text{m}$ ;目标2为缝洞含油异常

体,电阻率值为300 $\Omega\cdot\text{m}$ ;目标3为缝洞含气异常体,电阻率值为2000 $\Omega\cdot\text{m}$ ;目标4为致密异常体,电阻率值为5000 $\Omega\cdot\text{m}$ 。

图8是同一构造位置不同储层目标体上方电场水平分量振幅曲线图。从图中可以看出,含水目标体的电场在频率为2Hz时出现极小值,在0.25Hz时出现极大值;目标2到目标4的曲线形态与目标1大致相同,只是极小值逐渐增大且向高频段移动。

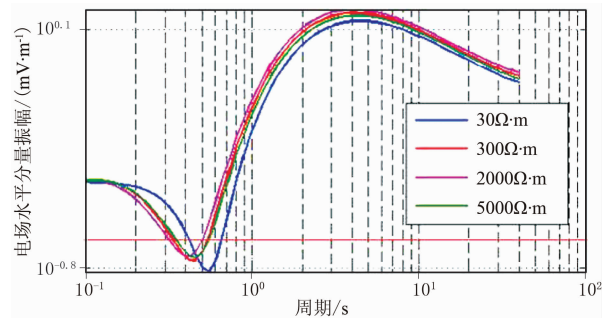


图8 电场水平分量振幅曲线

图9为横切储层目标测线应用式(1)计算的纯异常电场振幅差值断面。从图中可见电场差值由目标1到目标4逐渐减小。通常情况下,围岩是高阻,异常体与围岩的电阻率之比越大,异常响应越明显。当缝洞含油饱和度越高时,其电阻率与周围围岩差距越小,异常也就越不明显。目标1到目标4的电场差分别为140.0,40.0,2.2,0.6 $\mu\text{V}/\text{m}$ 。可以看出,对于目标4,异常信息已经微弱到不能识别,即使是目标3,异常信息也快接近背景噪声环境下要求的最小信号强度。在噪声较大情况下(1 $\mu\text{V}/\text{m}$ ),该目标体产生的信号难以可靠识别。对这一规模的小目标体要想得到足够可靠识别的异常信息,需要加大激发电流达25A以上或增加叠加次数大于8次,从而提高信噪比2.5倍以上,信号幅度达到5.5 $\mu\text{V}/\text{m}$ ,才能得到更加真实可靠的振幅曲线。

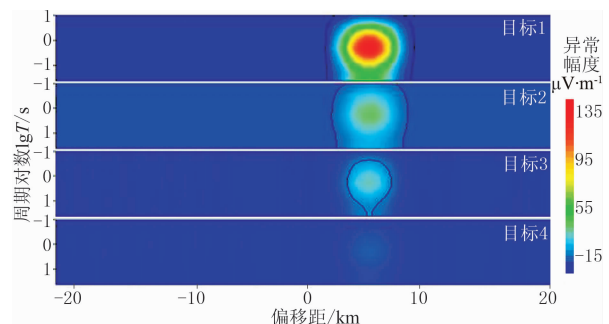


图9 电场水平分量振幅异常断面图

## 4 JZ 地区时频电磁法试验

为了进一步了解利用时频电磁法探测潜山内幕的可行性,在 JZ 地区已知地震构造位置,布设跨凹陷和隆起区的试验测线,进行数据采集,实测装置与模拟装置相同。测线部署如图 10 所示,仅展示试验测线 3 的结果。

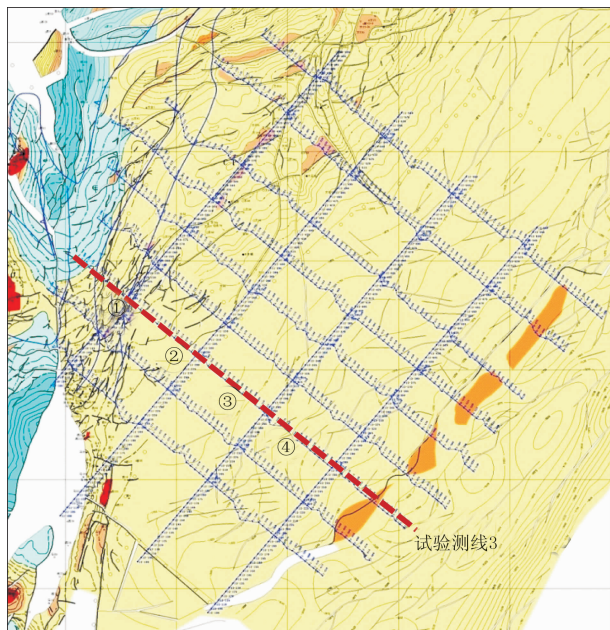


图 10 试验测线及其对应不同构造位置示意图

图 11 是试验测线不同构造位置实测电场水平分量振幅曲线。位置①~④分别对应图 2 中的目标 1~目标 4。由图 11 可知,实测数据与理论曲线形状基本一致,从实测数据可以看出,利用时频电磁法探测 JZ 地区内幕目标时,从凹陷区到隆起区,巨厚的低阻导电层厚度逐渐减小,极大值和极小值点由低频段逐渐移向高频段,与模拟规律完全相同。说明利用时频电磁法探测潜山内幕可获得有效异常。尽管野外工作中噪声比较大,但现有设备激发电流可达 100A、叠加次数可根据信噪比相应增加,以满足要求,在室内再施以有效去噪手段,完全能够取得可发现深层潜山异常目标体的信息。

对图 10 所示试验测线 3 数据进行反演,得到如图 12 所示的反演电阻率剖面。从图中可以看出,时频电磁勘探能够准确反映地下结构以及油气信息。

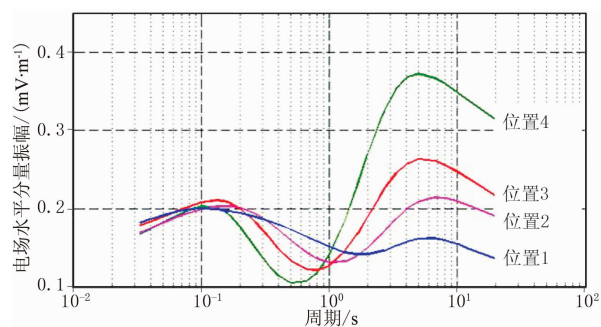


图 11 不同构造位置实测数据电场振幅曲线图

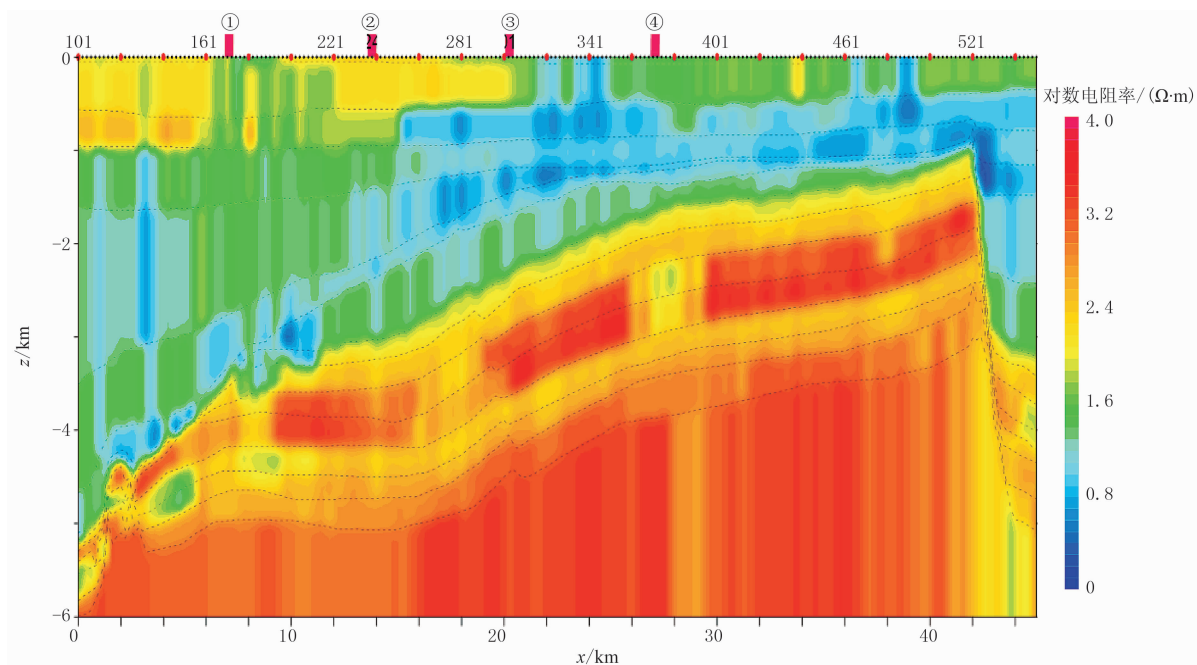


图 12 试验测线 3 反演电阻率剖面

## 5 结论与认识

本文分别分析了在目标体构造位置不同、规模不同以及与围岩电阻率差异不同等三种情况下的电场水平分量振幅曲线及去除背景场后的纯电场水平分量振幅断面图,对其进行分析,并通过与实测噪声比较分析探测内幕目标体的可行性,同时还进行了相关试验,得到以下认识。

(1)模拟研究证明,时频电磁法在JZ地区探测潜山内幕目标体是可行的。相同深度和特征的异常体位于不同构造位置具有不同的响应,需要采用不同施工参数;模拟研究给出了不同目标体规模及目标体电阻率时电场曲线特征及其纯异常的规律。

(2)在野外实际噪声背景下,JZ地区异常体产生的信号需大于 $1\mu\text{V}$ 才能够被检测出来,且拗陷区异常体较难识别。在一定深度时,当目标异常体小于某一值时基本无法识别,当与围岩的电性差异小于某一值时也基本无法识别;指出在实际工作中,针对这些目标,要加大电流强度或提高叠加次数以提高信噪比,才能得到高信噪比的振幅曲线和完整异常。

(3)对于JZ地区,使用时频电磁法进行勘探,能够有效探测到潜山内幕含油气目标,得出了相关异常规律,可以推广到类似地区。

感谢中国石油东方地球物理公司综合物化探处赵国、胡晓颖、魏强、王玉青高级工程师在本文研究过程中给予的指导和帮助。

### 参考文献

- [1] 高长海,张新征,查明等. 冀中拗陷潜山油气藏特征. 岩性油气藏,2011,23(6):6-12.  
Gao Changhai, Zhang Xinzhen, Zha Ming et al. Characteristics of buried hill reservoir in Jizhong Depression. Lithologic Reservoirs, 2011,23(6):6-12.
- [2] 夏志刚,徐从汤. 大城凸起成藏条件分析. 长江大学学报(自然科学版,理工卷),2012,9(5):87-89.  
Xia Zhigang, Xu Congtang. Study on reservoir forming condition of Dacheng swell. Journal of Yangtze University(Nat Sci Edit:Sci & Eng), 2012,9(5):87-89.

- [3] 王建瑞,刘趁花,郭永军等. 冀中拗陷霸县凹陷文安斜坡潜山油气成藏模式与勘探发现. 海相油气地质,2012,17(1):35-40.  
Wang Jianrui, Liu Chenhua, Guo Yongjun et al. A hydrocarbon accumulation model and petroleum discovery of cambrian buried hill reservoirs in Wen'an Slope, Jizhong Depression. Marine Origin Petroleum Geology, 2012,17(1): 35-40.
- [4] 赵贤正,金凤鸣,王余泉等. 冀中拗陷长洋淀地区“古储古堵”潜山成藏模式. 石油学报,2008,29(4):489-493.  
Zhao Xianzheng, Jin Fengming, Wang Yuquan et al. Buried-hill reservoir-forming mode of “old reservoir-old sealing formation” in Changyangdian area of Jizhong Depression. Acta Petrolei Sinica, 2008,29(4): 489-493.
- [5] 何展翔,王绪本. 时-频电磁测深法. 中国地球物理学会第十八届年会论文集,2002.
- [6] 赵志,何展翔,杨树江等. 时频电磁技术新进展及实例研究. 中国地球物理学会第二十六届年会论文集,2010.
- [7] 孙志华,付吉林,杨书江等. 时频电磁法勘探在尼日尔A区块的应用效果. 石油地球物理勘探,2012,47(增刊1):147-151.  
Sun Zhihua, Fu Jilin, Yang Shujiang et al. TFEM applications in the Block A, Niger. OGP,2012,47(S1): 147-151.
- [8] Zhdanov M S, Lee S K, Yoshioka K. Integral equation method for 3D modeling of electromagnetic fields in complex structures with inhomogeneous background conductivity. Geophysics, 2006, 71(6): G333-G345.
- [9] 沈金松,王志刚,马超等. 井间电磁油气储层监测技术的发展和应. 石油地球物理勘探,2014,49(1):213-224.  
Shen Jinsong, Wang Zhigang, Ma Chao et al. Application of the cross-hole electromagnetic method (CHEM) in hydrocarbon reservoir monitoring. OGP, 2014,49(1): 213-224.

(本文编辑:冯杏芝)

### 作者简介



高妍 博士研究生,1989年生;2011年本科毕业于吉林大学地球探测科学与技术学院勘查技术与工程专业;2014年获成都理工大学地球物理学院勘查地球物理专业硕士学位。现在中国石油大学(北京)地球物理与信息工程学院地质资源与地质工程专业攻读博士学位,主要从事电磁勘探方法的研究。