

时频电磁法在巴什布拉克— 乌泊尔构造带深部结构勘探中的应用

魏巍¹, 高文龙², 王腾宇¹, 高永才², 张振¹, 葛大壮², 袁崑铭², 姚孟远²

(1. 中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司, 库尔勒 841000;

2. 成都理工大学 地球勘探与信息技术教育部重点实验室, 成都 610059)

摘要: 利用时频电磁数据资料, 并结合测井资料约束提高电磁反演结果的分辨率, 探讨塔西南西部地区巴什布拉克构造带和乌泊尔构造带深层电性结构及其油气分布区域。该区域地形、浅地表形态以及深层地质结构都较为复杂, 无法得到有效的地震资料, 严重制约了目标层的油气勘探。时频电磁具有勘探深度大, 信噪比高, 不受高阻屏蔽的优点。通过对巴什布拉克—乌泊尔区域时频电磁资料进行处理解释, 有效识别了该区域的主要断裂及褶皱。南北向和西北向的反演电阻率剖面和极化率剖面, 展示了塔西南凹陷同时受南天山和西昆仑山双向挤压的电性结构特征, 两侧分别形成逆冲推覆体, 呈对冲构造形式, 覆盖于塔西南凹陷之上, 两侧推覆体发育多排逆冲断层, 呈叠瓦状分布, 其南侧为乌泊尔构造带, 北侧为巴什布拉克构造带, 与盆地呈现明显的断层接触关系, 南北两侧为区域性大断裂。

关键词: 塔西南; 时频电磁; 区域构造; 电阻率和极化率

中图分类号: P618.13; P631.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2024.03.10

0 引言

塔西南地区位于我国最大的内陆叠合复合含油气盆地塔里木盆地的西南部(图1), 为一个一级构造单元。其北临南天山褶皱带, 西南与昆仑山造山带北缘的克里克隆起相连接, 东北以色力布亚—玛扎塔克断裂为界, 与中央隆起区分开, 区域面积大于 $12 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[1-3]。塔西南油气地质条件相对发育, 研究区经历多期的构造运动形成当今的构造格局, 但是重要的成藏地质条件及作用过程不明朗, 关于构造演化对油气地质影响的研究甚少^[4]。通过研究该地区的深部结构, 期望发现区域构造对油气地质

的影响, 给予地质工作者参考。

其中喜山期运动对该区的构造变形影响最为强烈。喜山期运动使南天山和昆仑山造山带强烈抬升, 产生区域性的南北向的挤压应力场, 导致研究区内发育有典型的冲断~褶皱构造。因而研究区断裂构造发育十分丰富, 形成有多个构造, 这也导致了地震资料品质较差。

乌恰—乌泊尔以西位于塔西南南天山和西昆仑山两山接触部位, 包含巴什布拉克构造带和乌泊尔构造带北段。因同时受到两个褶皱冲断带的相互影响, 强烈的逆冲推覆作用使该区域断层、褶皱构造发育丰富, 构造特征复杂。由于地质构造活动强烈, 使得地震波散射严重, 地震勘探资料品质较差。在塔

收稿日期: 2023-02-09

第一作者: 魏巍(1982—), 男, 高级工程师, 主要从事电磁采集参数正演、重磁电联合反演、地质构造建模、可控源电磁激发激化(IP)效应与储层含油气性关系研究, E-mail: ww-tlm@petrolchina.com.cn。

通信作者: 高文龙(1994—), 男, 博士, 主要方向为电磁勘探正反演方法等相关研究, E-mail: 937093861@qq.com。

西南地区取得了很好的应用成果。因此,期望使用时频电磁资料,查明地下电性结构信息,进一步辅助地震资料处理。

时频电磁方法(TFEM)是一种油气勘探的新方法^[5]。基于电磁感应原理,在实际勘探中,同时接收时间域和频率域数据。在国内外油气勘探中得到了广泛应用。该方法勘探深度大、信噪比高、不受高阻屏蔽的影响,可以同时获得电阻率和极化率参数。配合地震,可进一步提高山前带油气勘探的准确度。

为提高该区域电性剖面地质解释的精确度以查清该区域的地质结构,使用时频电磁归一化频率域数据,由测井资料等约束,使用电场和磁场以及相位等数据约束,同时反演电阻率和极化率,从而获取构造在电阻率和极化率反演剖面中的特征。电阻率反演剖面存在一组低阻—高阻—低阻—高阻互层的地层,极化率反演剖面在对冲区域存在较强极化特征。

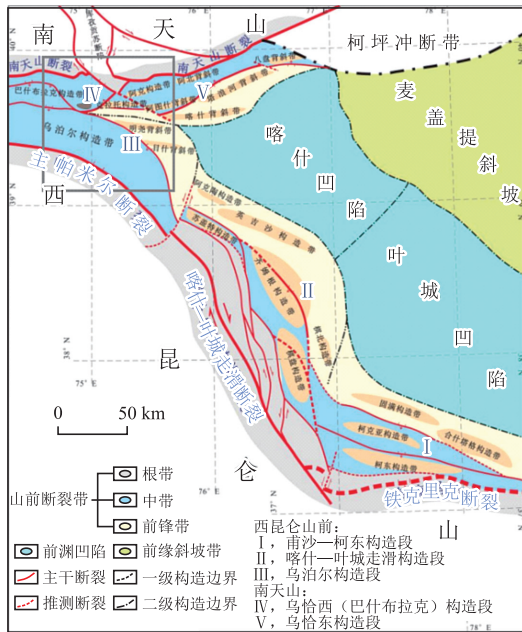


图1 塔西南拗陷新生代山前断裂带构造单元划分图^[6]

Fig.1 Tectonic unit division map of the Cenozoic pre-mountain fault zone in the southwest Tarim Depression ^[6]

1 勘探区域地质特征

如图2所示,AB和CD代表测线。研究区位于塔西南喀什凹陷西侧,其构造单元主要为南天山山前褶皱冲断带西段的巴什布拉克褶皱—冲断带以及西昆仑北缘褶皱—冲断带的乌泊尔逆冲推覆构造带。由于该区域天山和昆仑山靠的较近,两山褶皱

—冲断带相互接触,因此两构造单元同时受到南天山和西昆仑的推覆影响,向北的逆冲推覆构造与向南的冲断构造相互叠加,造成区域内中生界冲断褶皱变形强烈,主要以冲断构造为主,局部表现为对冲样式,并发育有褶皱构造。

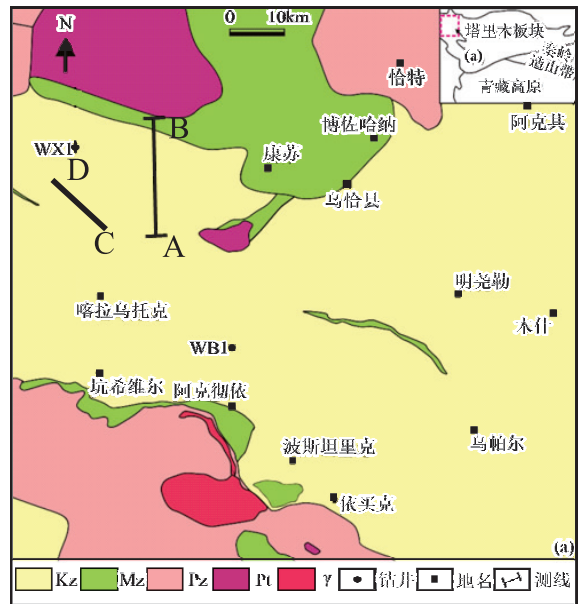


图2 测线位置示意图(见图1灰色方框)

Fig.2 Schematic diagram of the location of the survey line

2 勘探区域物性特征

区域内新生界大面积出露,因该区域复杂的地质构造,只在山前出露少许的中生界和变质基底,部分区域存在地层缺失的情况,如WX1井钻遇地层显示中生界克孜勒苏群直接与震旦系基底接触,缺失古生界,WB1井为钻遇克孜勒苏群但钻遇中生界。根据已有的构造带的区域地质资料显示,并结合WB1井和WX1井的电阻率测井曲线及录井岩样信息,区域内地层从上到下有次高一低一高一低一高的变化规律。

依次为发育:①第四系西域组,主要为细砾岩,电阻率表现为次高阻;②新近系—古近系的中上部,地层为少泥岩互层,且泥岩含量相对较多,因此电阻率偏低;③古近系底部和白垩系顶部含有一套石膏岩,电阻率值较大;④白垩系底部为克孜勒苏群的砂泥岩互层,电阻率值相对较低;⑤古生界二叠系灰岩及元古界高阻基底。

极化率主要与油、气和水等相关,油气水等不仅与围岩的电阻率差异较大,还可以与固体物质形成

双电层结构,通过人工电场源的激励下,由于充放电的效应,近而产生 IP 异常。同时 IP 效应也会影响电磁场的衰减特征,因此在烃源岩及其上方会产生较明显的电性异常及 IP 异常^[7]。

3 时频电磁方法

时频电磁法最早由 Davydycheva 提出,由中国东方地球物理公司从俄罗斯引进并加以改进完善^[8-10]。经过二十几年的发展,在国内外油气勘探取得了众多的成果^[11]。人工场源电磁勘探都是基于宏观电磁场理论,即麦克斯韦方程组^[12](公式 1)。

$$\begin{cases} \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ∇ 为哈密顿算子, \mathbf{E} 为电场, \mathbf{H} 为磁场强度, \mathbf{D} 为电位移矢量, \mathbf{B} 为磁感应强度。

时频电磁方法由大功率发电机组供电,由多根并联的接地铜导线向地下供不同频率的方波电流(如图 3 所示),激发波形一般为占空比 1:1 的正负方波,发射信号最高频率可达为 256 Hz,低频率为

256 s。从低频到高频连续激发,低频段和高频段均可多次重复激发。该方法将频率域测深与时间域测深统一在一个系统中。可根据勘探目标的深度选择不同激发频率和不同类型的激发波形。东方地球物理公司在时频电磁采集阶段采用了大功率发射源进行信号发射,可以获得深部流体的有效激发极化信息^[13]。在偏离电偶源一定远处布设电磁接收站,偏移距一般为几千米到十几千米,接收站用电极接收平行于 AB 的电场(E_x)信号、用垂直磁棒接收磁场(Hz)信号,站与站之间的距离一般为 50 m~200 m。在资料处理和解释中,通过对异常场的分析来研究电性构造并预测油气有利区,主要利用导电性和极化性两类参数^[14-15]。

实际采集中,发射源长度 6 km、供电电流>50 A、偏移距 8 km、测点间距 0.2 km。测线位于两山接触部位,是地形、浅表结构以及深层构造都较为复杂的区域。地下介质的岩性变化、构造(断层、褶皱)发育等均可造成电性的变化,由于 TFEM 探测深度大,受干扰因素少,通过正确分析电磁剖面的电性差异可很好地揭示地下构造的展布情况。

解释过程首先在 TFEM 原始资料预处理结果的基础上对归一化的电磁场数据进行分析,了解工区存在的主要构造,利用工区内物性统计结果建立相关地质构造模型进行拟二维正反演研究,提取构造在反演剖面中的信息。

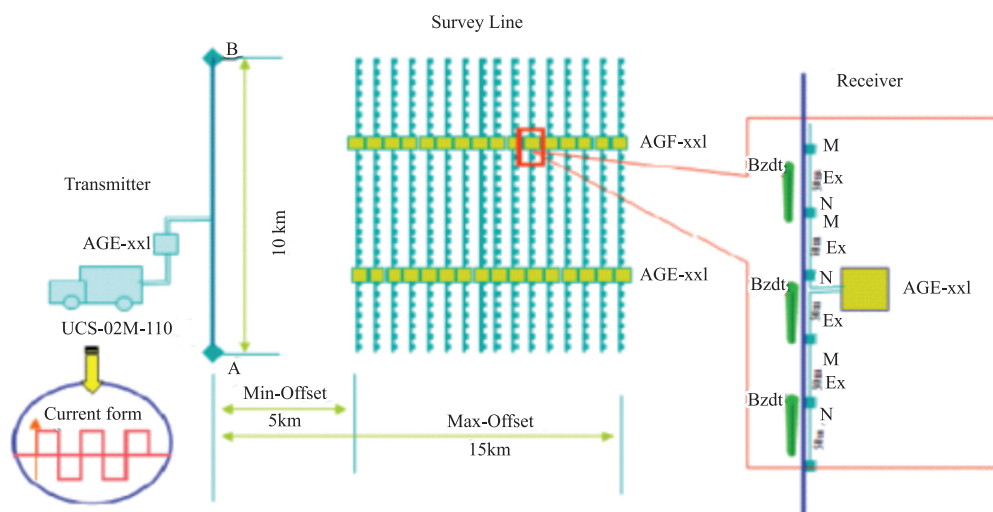


图 3 时频电磁激发—采集装置示意图^[16]

Fig. 3 Schematic diagram of time-frequency electromagnetic excitation-acquisition device^[16]

4 时频电磁正反演方法

时频电磁法传统反演,主要通过 E_x 或 H_z 求取全区视电阻率,由全区视电阻率参数进行反演,反演结果的多解性强。 H_z 是 TFEM 勘探中非常有意义的分量,可以弥补电场分量受干扰时的不足^[17-19];为了减小反演结果的多解性,进一步提高反演结果的分辨率,笔者采用 E_x 和 H_z 数据联合反演,进一步约束反演结果。使用 Cole-Cole 模型同时反演电阻率参数和极化率参数。正演使用业内广泛使用的开源程序 dipole1D。

激电信息反演主要将电阻率模型替换成频域 Cole-Cole 复电阻率模型^[20-22], Cole-Cole 模型为:

$$\rho(\omega) = \rho_0 \left\{ 1 - m \left[1 - \frac{1}{(j\omega\tau)^c} \right] \right\} \quad (2)$$

式中: ω 表示圆频率,单位 Hz; $\rho(\omega)$ 表示频率为 ω 时的岩矿石的复电阻率,单位 $\Omega \cdot m$; ρ_0 表示零频电阻率(亦即直流电阻率,是介质在充分激发情况下的电阻率),单位 $\Omega \cdot m$; m 表示极化率; τ 表示时间常数,单位 s; c 为频率相关系数。

表 1 理论地电模型参数表

Tab. 1 Parameter table of theoretical geoelectric model

顶深/m	电阻率/ $(\Omega \cdot m)$	极化率
0	80	0.04
40	100	0.12
150	8	0.06
325	50	0.15
575	5	0.05
715	10	0.15
765	25	0.25
815	70	0.4
875	15	0.1
965	20	0.01
1 665	5	0.075
2 115	2 000	0.005
2 765	50	0.01
2 865	200	0.1
3 265	500	0.12
3 445	1 000	0.15

表 1 是所设计理论模型的地电参数表,对该模型有、无激电效应时分别进行模拟的结果见图 1 中的曲线对比情况。由图可知,当存在激电效应时, ExA 曲线由短周期到长周期(或由高频到低频)基本上表现为各极化异常电性层所引起激电效应的累计迭加特征,即随着频率的降低两者之间的偏差呈逐渐递增的明显态势。

多参数联合反演目标函数^[21]:

$$T(m) = \|\partial m\|^2 + \xi^{-1} [\|Wd_{E_x} - Wf(m)\|^2 + \beta \|Wd_{H_z} - Wf(m)\|^2 - \chi^2] \quad (3)$$

式中: m 为模型参数:包含电阻率极化率等模型参数; $T(m)$ 为目标函数; ∂m 为模型梯度; ξ^{-1} 为拉格朗日乘子:平衡惩罚函数之间的关系; W 为观测数据的权重; $f(m)$ 为正演响应函数:cole-cole 电阻率模型正演响应;

$\beta = \frac{\text{median}[\|Wd_{E_x} - Wf(m)\|]}{\text{median}[\|Wd_{H_z} - Wf(m)\|^2]}$, 为不同量级的平衡因子; χ^2 为期望拟合差; median 是中值函数;大致的反演流程示意图,如图 5 所示。

使用成都理工大学王绪本教授团队自主研发的 Mtsoft2D 软件建立复杂模型,如图 6 和图 7 所示,由理论模型和反演结果表明,极化率和电阻率对应较好,特别是高阻高极化区域,同时也验证了反演算法的可行性。

为研究电法勘探探测复杂山前构造的可行性,研究电磁勘探法对复杂地质构造有较强的识别能力,

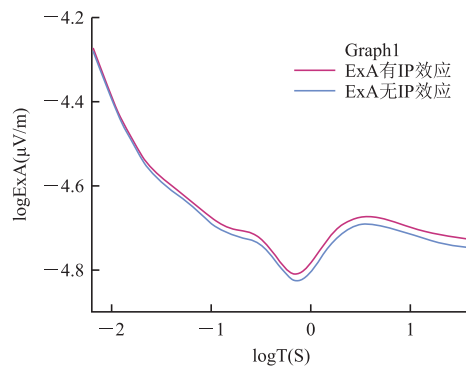
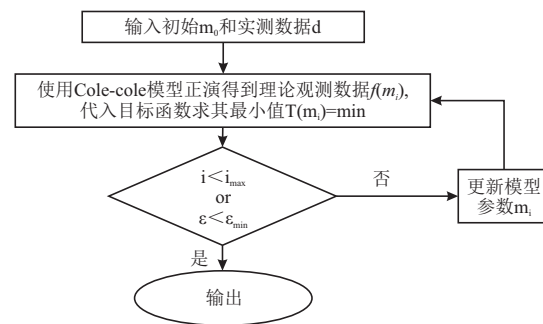


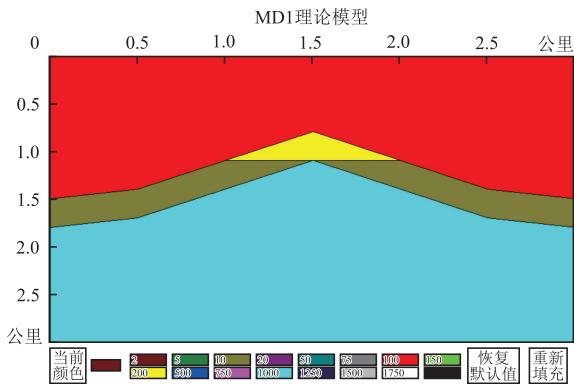
图 4 有无激电效应时 ExA 模拟曲线对比图
Fig. 4 Comparison of ExA simulation curve with and without excitation effect



i 为迭代次数, i_{max} 为最大迭代次数, ϵ 为均方根误差, ϵ_{min} 为均方根误差限制;输出为电阻率和极化率反演结果

图 5 反演流程示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the inversion process



红色区域 $100 \Omega \cdot m$; 黄色区域 $200 \Omega \cdot m$

图 6 理论模型

Fig. 6 Theoretical model

我们依据本区地层的电性结构特征, 设置了 2 个不同的数值模拟模型, 分别为断裂发育模型和挤压褶皱模型。

所有模型的背景特征为: 总体上包含 5 个主要电性层: 第一电性层, 电阻率 $500 \Omega \cdot m$, 中心位置厚度 500 m, 代表第四系次高阻地层; 第二电性层, 电阻率 $100 \Omega \cdot m$, 中心位置厚度 2 000 m, 代新生界沙泥岩互层; 第三电性层, 电阻率 $10\ 000 \Omega \cdot m$, 中心位置厚度 1 000 m, 代表白垩系顶部高阻石膏岩层; 第四电性层, 电阻率 $50 \Omega \cdot m$, 中心位置厚度 800 m, 代表白垩系底部次低阻砂泥岩互层; 第五电性层, 电阻率 $2\ 000 \Omega \cdot m$,

本次模拟为二叠系及元古界高阻基底。

断裂作用是地质构造的最基本形式之一。不仅控制着盆地的沉积演化和构造变形, 而且盆地中油气的生成、运移及聚集规律等也与其关系密切^[5]。区域内断层类型为逆断层, 且主断裂出露地表, 基于划分电性层的电性参数, 构建如图 8(a) 所示逆断层构造模型。

上述逆断层模型的反演结果如图 8(b) 所示。受初始模型影响, 地表出现电阻率明显差异的位置与模型断裂带的出露位置基本一致。在断裂处, 低电阻率连续, 无明显错断。靠近断裂处的下盘电性分界面模糊, 随着与断裂的距离越大, 纵向电性分界面越清晰。受断裂影响, 上下盘基底电阻率有明显差异, 下盘基底电阻率高于上盘。整体上看, 反演剖面对基底上覆盖的低电阻地层的有所体现, 但受到断裂的影响, 沿着断裂方向会出现与断裂倾斜方向一致低阻条带假异常, 从而形成贯穿基底的深大断裂的假象。

褶皱是岩石或岩层受力而发生的弯曲变形, 是地壳中最基本的构造样式, 也是发育最广泛的构造。根据相关资料显示, 研究区内褶皱发育较为丰富。为获取该区域内褶皱构造在电磁反演剖面中的表现特征, 识别真假异常, 构建如图 9(a) 所示对称褶皱模型开展正反演模拟试验。

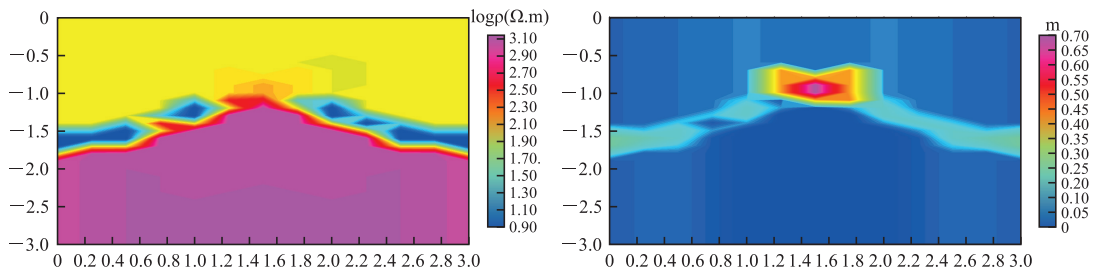


图 7 反演电阻率断面和反演极化率断面

Fig. 7 Invert resistivity cross-section and invert polarizability cross-section

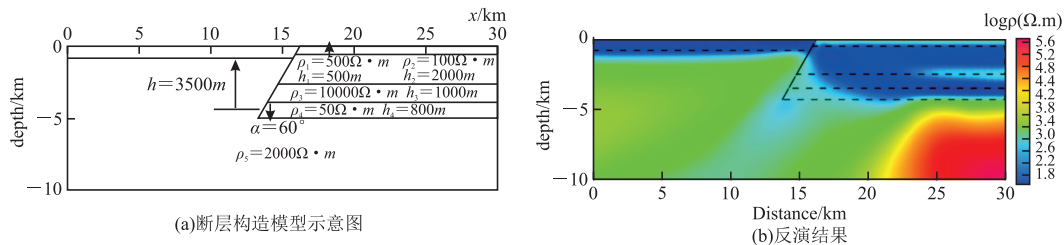


图 8 断层构造模型示意图和反演结果

Fig. 8 Schematic diagram of fault construction model and inversion result

模型的反演结果如图 9(b)所示。反演结果对地层起伏形态有一定的展示。反演结果浅部低阻电性层电性连续性好,起伏形态与实际模式基本吻合。深部地层不能从剖面的电性差异进行有效识别,其展布情况也不能从剖面获取。反演剖面中,受褶皱构造的影响,中生界低阻地层电性分界面不能分辨,在褶皱背斜转折端下方会出现“圆饼状”的高阻假异常。

5 勘探效果分析

研究区域内 TFEM 测线 AB 为南北向,从南到北依次跨越乌泊尔构造带以及巴什布拉克构造带两个构造带,全长 19 km,测点坐标从南到北逐渐增大,测线 CD 为西北向,全长 14 km,测点坐标从西到北逐渐增大(测线位置如图 2 所示,测线数据由塔里木油田公司提供)。在资料的预处理和解释过程中,为保证 TFEM 本身的特性,经过预处理后的电磁场曲线与处理前结构保持一致,且处理后曲线相对光滑,从高频到低频信息逐步减少,符合电磁勘探规律。

如图 10 所示,AB 剖面左侧为靠近西昆仑山的区域,受西昆仑山造山带的影响,基底抬升较高,因此左侧为显示底部为一埋深较浅的高阻异常。在剖

面 5 km 以及 15 km 的范围内,基底之上覆盖有厚度较大的新生界和中生界,且地层电阻率较低,因此在反演剖面上显示为低阻异常。同时该区域具有较高的极化异常,但其中的高阻层较薄,波状起伏特征明显,低阻层较厚,难以区分具体的层位信息。依据上述褶皱模型反演结果剖面中出现的假异常相似,推测新生界和中生界盖层受两山影响形成有褶皱构造。在反演剖面的中部有一贯穿基底的低阻异常,似深大断裂,与断层构造模型的反演结果剖面有类似的异常反应,推测该处是由与假异常倾斜方向一致的断层导致,造成基底电阻率显示异常。由 cole-cole 模型可知,极化率与电阻率密切相关,地层上 C-P 表现出高极化特征,基底高阻区域表现为低极化特征。油气区域一般表现为高阻高极化特征,含水等非油气流体,可能为低阻高极化特征。

如图 11 所示,CD 剖面与研究区上 WX1 井相邻,根据该区域实际的地质资料与该井测井资料,可推测该南天山与西昆仑山的接触地段地层新生界地层为新近系和古近系地层,且电阻率较低,较难精细地将层位区分出来。中生界地层主要为白垩系地层,白垩系上部为一高阻薄层标志层,下部为低阻。高极化地层,主要集中在 C-P 系,高阻高极化区域可能为有利油气藏区域。

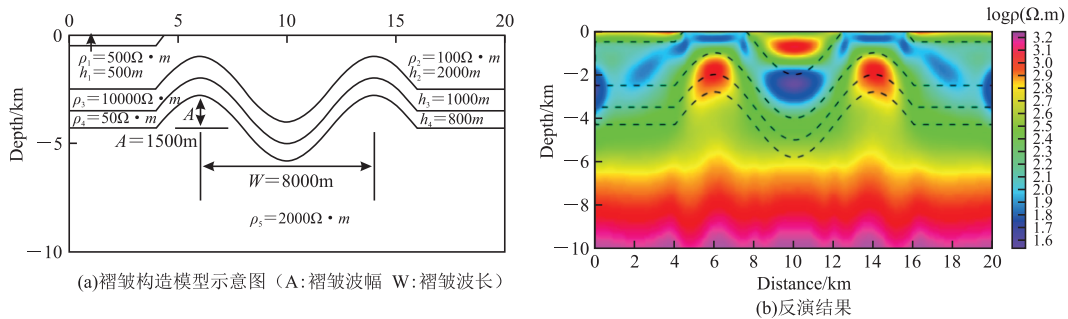


图 9 褶皱构造模型示意图和反演结果

Fig. 9 Schematic diagram of fold construction model and inversion result

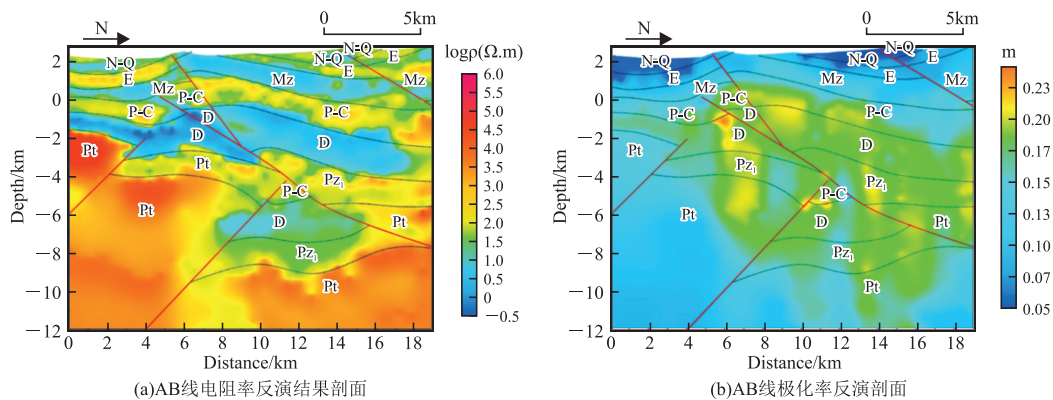


图 10 AB 线电阻率反演结果剖面 和 AB 线极化率反演剖面

Fig. 10 AB wire resistivity inversion result profile and AB linear polarizability inversion profile

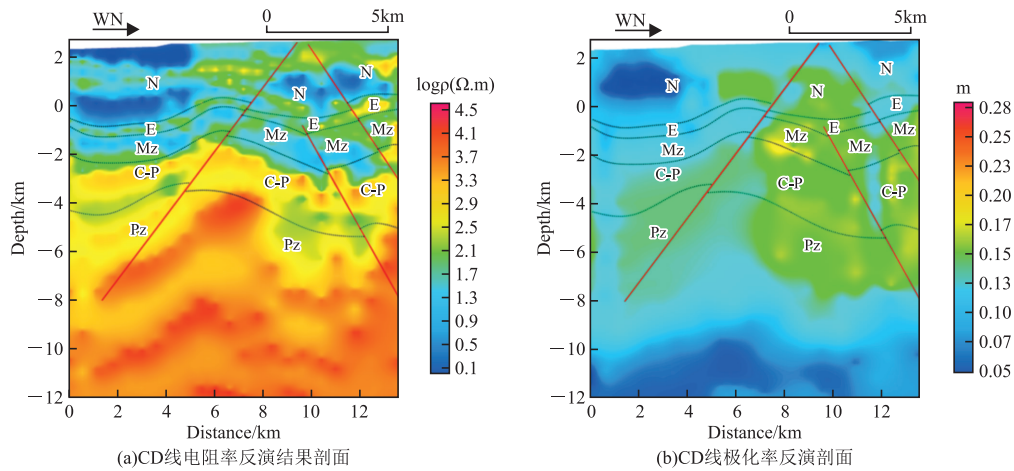


图 11 CD 线电阻率反演结果剖面 and CD 线极化率反演剖面

Fig. 11 Section of CD line resistivity inversion results and CD linear polarizability inversion profile

6 结 论

激电效应下,电场振幅由短周期到长周期(或由高频到低频)基本上表现为各极化异常电性层所引起激电效应的累计迭加特征,随着频率的降低电场振幅值越来越大。

由电场和磁场数据综合约束,进行电阻率和极化率同步反演,反演结果表明此方法是可行的,并且具有一定的效果。

利用构建构造模型、井约束反演等辅助手段开展 TFEM 剖面综合地质解释的方法在一定程度上提高了对复杂构造区时频电磁剖面地质解释工作的准确性。

笔者对塔西南地区巴士布拉克—乌泊尔的 TFEM 剖面进行电阻率和极化率综合分析,客观地反映了该区域因同时受到南天山和西昆仑山的逆冲推覆而形成的对冲构造,揭示了“叠瓦状”断裂以及褶皱构造的电性结构展布特征。

参考文献:

- [1] 高敏. 塔里木盆地西南坳陷西段构造几何学和运动学特征[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
GAO M. Geometry and kinematics of the western part of southwest Tarim Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2012. (In Chinese)
- [2] 何娟, 王毅, 刘士林, 等. 塔里木盆地西南坳陷东部构造特征及对油气成藏的控制[J]. 石油实验地质, 2016, 38(3): 326—332.
HE J, WANG Y, LIU S L, et al. Characteristics of fault structure and its control on hydrocarbon accumu-

lation in the eastern part of southwestern Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(3): 326—332. (In Chinese)

- [3] 何娟. 塔里木盆地西南坳陷东部构造几何学与运动学特征[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2012.
HE J. Geometry and kinematics of eastern part of southwest Tarim Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2012. (In Chinese)
- [4] 廖晓. 塔里木盆地西南坳陷中新世构造演化特征及对油气成藏的控制作用[D]. 西安: 西北大学, 2018.
LIAO X. Meso-cenozoic tectonic evolution characteristics and its controlling effects on hydrocarbon accumulation in the southwest depression of Tarim Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2018. (In Chinese)
- [5] 何展翔, 胡祖志, 王志刚, 等. 时频电磁(TFEM)技术: 数据联合约束反演[J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(4): 898—905.
HE Z X, HU Z Z, WANG Z G, et al. Time-frequency electromagnetic (TFEM) technique: Step-by-step constraint inversion based on artificial fish swarm algorithm[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(4): 898—905. (In Chinese)
- [6] 孙统. 塔里木盆地塔西南坳陷山前断裂带构造解析[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2020.
SUN T. Structural analysis of the piedmont fault zone in southwestern depression of Tarim Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2020. (In Chinese)
- [7] 何展翔, 王绪本. 油气藏电性异常模式与电磁法油气检测[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(1): 102—106.
HE Z X, WANG X B. Geo-electrical anomalous pattern of reservoir and oil/gas detection by electromag-

- netic survey[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2007, 42(1): 102—106. (In Chinese)
- [8] DAVYDYCHEVA S, RYKHLINSKY N, LEGEIDO P. An electrical prospecting method for oil search using the induced polarization effect[C]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2004*. Society of Exploration Geophysicists, 2004: 604.
- [9] 张锐锋, 严良俊, 孙社敏, 等. 时频电磁法时域激电参数提取与应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2016, 51(6): 1227—1232.
- ZHANG R F, YAN L J, SUN S M, et al. IP parameter extraction from TFEM data in the time domain[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, 51(6): 1227—1232. (In Chinese)
- [10] 程见中. 时频电磁法全参数反演方法研究与应用[D]. 荆州: 长江大学, 2018.
- CHENG J Z. Study and application of full-parameter inversion method in time-frequency electromagnetic Method[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2018. (In Chinese)
- [11] 何展翔, 董卫斌, 赵国, 等. 时频电磁(TFEM)技术: 数据处理[J]. *石油地球物理勘探*, 2021, 56(6): 1391—1399.
- HE Z X, DONG W B, ZHAO G, et al. Time-frequency electromagnetic (TFEM) technology: Data processing[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2021, 56(6): 1391—1399. (In Chinese)
- [12] 路宏敏, 赵永久, 朱满座. 电磁场与电磁波基础[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- LU H M, ZHAO Y J, ZHU M Z. *Electromagnetic field and electromagnetic wave foundation*[M]. Beijing: Science Press, 2006. (In Chinese)
- [13] 张春贺, 刘雪军, 周惠, 等. 基于时频电磁法的富有机质页岩层系勘探进一步研究[J]. *石油物探*, 2015, 54(5): 627—634.
- ZHANG C H, LIU X J, ZHOU H, et al. A step forward study for the exploration of organic-rich shale by using time-frequency electromagnetic method(TFEM)[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2015, 54(5): 627—634. (In Chinese)
- [14] 高文龙, 严良俊, 周磊. 井中激电三维数值模拟及井眼影响因素分析[J]. *地球物理学进展*, 2021, 36(3): 1257—1266.
- GAO W L, YAN L J, ZHOU L. 3D numerical simulation of in-hole IP and analysis of borehole influencing factors[J]. *Progress in Geophysics*, 2021, 36(3): 1257—1266. (In Chinese)
- [15] PATELLA D. Introduction to ground surface self-potential tomography [J]. *Geophysical Prospecting*, 1997, 45(4): 653—681.
- [16] 高妍. 时频电磁法探测古潜山内幕油气的应用研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- GAO Y. The application of using TFEM method to detect the reservoir targets in buried-hills of DCH uplift and the test research[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014. (In Chinese)
- [17] 胡祖志, 雷鸣, 刘雪军, 等. 双方位三维时频电磁模拟研究[C]. 2022年中国石油物探学术年会论文集(下册), 2022: 318—321.
- HU Z Z, LEI M, LIU X J, et al. Research on two-dimensional time-frequency electromagnetic simulation [C]. *Proceedings of the 2022 China Petroleum Geophysical Annual Conference (Part II)*, 2022: 318—321. (In Chinese)
- [18] TIAN Y K, ZHOU H, MA Y Y, et al. Prediction study of hydrocarbon reservoir based on time - frequency domain electromagnetic technique taking Ili Basin as an example[J]. *Applied Geophysics*, 2020, 17(5): 687—699.
- [19] HE Z X, YU G, WANG Z G, et al. Advanced progress of TFEM method for hydrocarbon mapping[C]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2017*. Houston, Texas. Society of Exploration Geophysicists, 2017: 1225—1230.
- [20] 马振军, 底青云, 薛国强, 等. 地—空瞬变电磁法电阻率成像研究与应用[J]. *地球物理学报*, 2021, 64(3): 1090—1105.
- MA Z J, DI Q Y, XUE G Q, et al. The research and application of resistivity imaging of semi-airborne transient electromagnetic method[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, 64(3): 1090—1105. (In Chinese)
- [21] 郭鸿喜, 曹杨, 何宇霖, 等. 时频电磁法多分量联合反演及在川西火成岩勘探中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2022, 57(2): 452—458.
- GUO H X, CAO Y, HE Y L, et al. Multi-component joint inversion for time-frequency electromagnetic (TFEM) method: A case study of igneous rock prospecting in western Sichuan[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2022, 57(2): 452—458. (In Chinese)
- [22] GHANATI R, AZADI Y, FAKHIMI R. RESIP2DMODE: A MATLAB-based 2D resistivity and induced polarization forward modeling software [J]. *Iranian Journal of Geophysics*, 2020, 13(4): 60—78.

Application of time-frequency electromagnetic method in the exploration of deep structures in the Bashibulak-Upor tectonic belt

WEI Wei¹, GAO Wenlong², WANG Tengyu¹, GAO Yongcai²,
ZHANG Zhen¹, GE Dazhuang², YUAN Kunming², YAO Mengyuan²

(1. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla 841000, China;

2. Key Laboratory of Earth Exploration and Information Technology, Ministry of Education, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

Abstract: Using time-frequency electromagnetic data and logging data constraints to improve the resolution of electromagnetic inversion results, the deep electrical structure and oil and gas distribution areas of Bashkbulak Belt and Upoer Structural Zone in the southwest and western regions of Taxian were discussed. This area's topography, shallow surface morphology, and deep geological structure are relatively complex, and effective seismic data cannot be obtained, which seriously restricts the oil and gas exploration of the target layer. Time-frequency electromagnetic has the advantages of large exploration depth, high signal-to-noise ratio, and is not subject to high-resistance shielding. The main faults and folds in this area were effectively identified through the processing and interpretation of the time-frequency electromagnetic data of the Bashibulak-Upor region. The inverted resistivity profile and polarizability profile in the north-south and northwest directions show the electrical, structural characteristics of the southwest depression of the tower being extruded by the South Tianshan Mountain and Kunlun Mountain simultaneously. The two sides form a thrust pushover in the form of a hedge structure, covering the southwest depression of the tower, and the pusher on both sides develops multiple rows of thrust faults, which are distributed in a shingle pattern; the south side is the Wupoer tectonic belt, the north side is the Bashkbulak tectonic belt, and the basin shows obvious fault contact relationship, and the north and south sides are regional large faults.

Keywords: southwest of Taxi; time-frequency electromagnetism; zone construction; resistivity and IP