



利用时频电磁法识别辽河盆地东部凹陷火成岩油气目标

石艳玲¹, 刘雪军¹, 魏强², 索孝东¹, 董卫斌¹, 何展翔³

1. 中国石油东方地球物理公司, 河北涿州 072751;

2. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北保定 071051;

3. 南方科技大学地球与空间科学系, 广东深圳 518055

摘要: 时频电磁法具有激发信号强、探测深度大、精度高的特点, 可以通过探测油气藏的电和电化学异常确定含油气状况, 是精细识别火成岩储层目标并进行地面油气检测技术中最有潜力的方法之一。通过统计辽河盆地中 HX 凹陷电测井资料, 证实了时频电磁法具备识别不同火成岩的物性基础。井震-时频电磁联合反演落实了断裂-构造特征, 对沙河街组火成岩内幕刻画更清晰, 共识别出沙河街组内幕沙三段 5 期火山活动。通过提取与电阻率和极化率相关的振幅和相位异常, 对比已知钻井出油情况, 总结出了一套极化率评价的分级标准。结合地震资料, 运用时频电磁法, 反推 HX 凹陷油气运移机制。通过研究获得了该区油气评价模板。根据这一模板在该地区识别出多个油气有利区, 并经后续钻探证实。该方法可为类似地区油气评价提供借鉴。

关键词: 时频电磁; 火成岩储层; 极化异常; 油气检测; 辽河盆地

IDENTIFICATION OF IGNEOUS ROCK RESERVOIRS IN EASTERN DEPRESSION OF LIAOHE BASIN BY TIME-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC METHOD

SHI Yan-ling¹, Liu Xue-jun¹, WEI Qiang², SUO Xiao-dong¹, DONG Wei-bin¹, HE Zhan-xiang³

1. Oriental Geophysics Company, PetroChina, Zhuozhou 072751, Hebei Province, China;

2. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, CGS, Baoding 071051, Hebei Province, China;

3. Department of Earth and Space Sciences, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, Guangdong Province, China

Abstract: Time-frequency electromagnetic method (TFEM), characterized by strong excitation signal, large detection depth and high precision, is one of the most promising techniques for the fine identification of igneous rock reservoirs and surface oil-gas detection, which can determine the oil-gas content by detecting the electrical and electrochemical anomalies of oil-gas reservoirs. Through analyzing the electrical logging data of HX sag in Liaohe Basin, it is confirmed that TFEM has the physical basis to identify different igneous rocks. The fault structure characteristics as well as the igneous rock inner structures of Shahejie Formation are obtained by the well seismic-TFEM joint inversion, and 5 stages of volcanic activities within the third member of Shahejie Formation are identified. A set of classification standard for polarizability evaluation is summarized through the extraction of amplitude and phase anomalies related to resistivity and

收稿日期: 2022-08-29; 修回日期: 2022-11-11. 编辑: 张哲.

基金项目: 国家自然科学基金项目“深地/深海探测中强电流激发下可控源电磁法激电效应机理研究及应用”(41874085); 中国石油集团科学研究与技术开发项目(2021DJ3706).

作者简介: 石艳玲(1983—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事地球物理资料的综合解释, 通信地址 河北省涿州市范阳中路 307 号, E-mail//shiyanning01@cnpc.com.cn

通信作者: 何展翔(1962—), 男, 博士, 教授, 主要从事电磁探测方法研究及应用, 通信地址 广东省深圳市南山区学苑大道 1088 号, E-mail//hezhang@sustech.edu.cn

polarizability, and comparison of oil production condition of the known wells. Combined with the seismic data, the oil-gas migration mechanism in HX sag is reversed by TFEM. The oil-gas evaluation template in the area is obtained through the research, by which several oil-gas favorable areas are identified and verified by subsequent drilling work. The method can provide reference for oil-gas evaluation in similar areas.

Key words: TFEM; igneous rock reservoir; polarization anomaly; oil-gas detection; Liaohe Basin

0 前言

由于火成岩的屏蔽作用及其岩性的复杂多变,深层火成岩储层目标的识别一直是油田勘探难题.面对这一难题,单纯依靠地震方法,勘探风险非常之大,人们一直试图使用更多的勘探方法^[1-3].诸多的火山岩勘探实践表明,电磁勘探方法在火山岩目标研究中可以发挥重要作用^[4-5].火成岩储层具有明显的电性和磁性,可以通过研究火山岩地层的电性特征提高火山岩储层识别的可靠性^[6].张长江等通过研究发现火成岩良好的物性是电磁测深的基础,能够有效确定深部岩浆岩活动区及火山岩的分布^[7].刘云祥等基于岩石磁性和电阻率差异,采用重磁电联合的方法划分火山岩岩性岩相,研究成果得到其他资料佐证^[8-9].

多年的勘探实践证明,辽河拗陷具有优越的石油地质条件^[10-13].因目标层埋藏深度大、火成岩的屏蔽作用等影响,应用地震方法进行勘探时,中深部地层的成像精度有限,而电磁勘探受火山岩地层的影响相对较小.近几年,应用时频电磁法在辽河盆地东部凹陷开展了大量工作,解决了该区沙河街组三段火成岩岩性岩相的圈定,以及 HX 凹陷南侧东营组和沙一段油气分布等一系列问题.

时频电磁法(time-frequency eletromagnetic method, TFEM)是近年来发展起来的一种大功率可控源电磁勘探方法.该方法采用类似非纵大偏移距地震勘探的工作方式,利用大功率发射源激发,在接收端同时采集时间域和频率域信号,具有激发信号强、探测深度大、应用效果好的特点^[14-15],在国内外得到了广泛的应用,成为油气勘探中的一种不可或缺的重要手段^[14-17].特别是在我国塔里木盆地、准噶尔盆地的火山岩储层目标勘探中取得较好的应用效果^[18-19].因此,应用时频电磁法解决 HX 凹陷沙三段火成岩储层岩性、岩相及分布问题,并通过反演极化率直接检测油气,对中国东部探区火成岩油气藏的勘探具有重要意义.本研究从统

计研究区内电测井资料出发,通过将时频资料与已知油井出油情况对比,总结出一套极化率评价的分级标准,在该地区识别出多个油气有利区,并经后续钻探证实.该方法亦可为类似地区油气评价提供借鉴.

1 物性特征分析

物性差异是地球物理勘探的基础.电阻率统计分析工作是时频电磁法后续处理解释的关键步骤.对研究区内 24 口钻井进行了统计分析,得到以火山岩为主的新近系沙河街组三段(E_3s^3)整体表现为高阻特征.从部分钻井的沙三段岩性及电测井曲线柱状图(图 1)可见,沙三段主要发育粗面岩、玄武岩、火山碎屑岩和

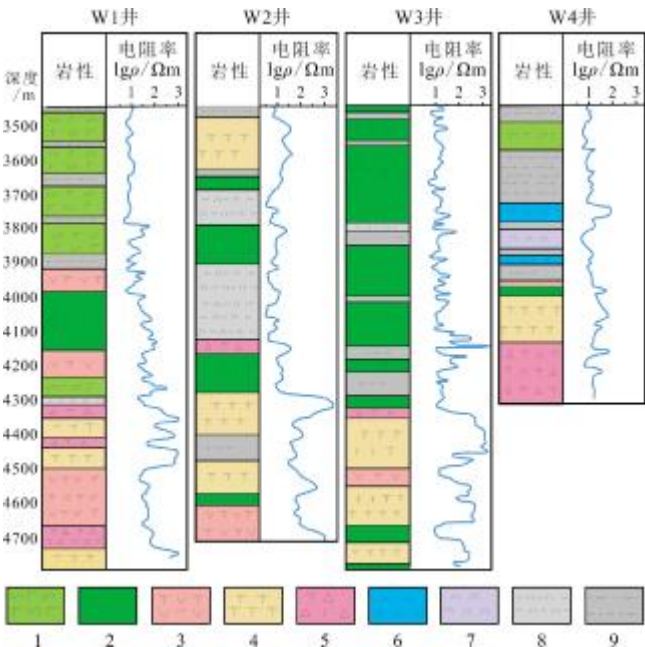


图 1 钻井沙三段岩性及电测井曲线柱状图

Fig. 1 Lithology columns and electric logging curves of E_3s in drillhole

1—蚀变玄武岩 (altered basalt); 2—玄武岩 (basalt); 3—粗安岩 (trachyandesite); 4—粗面岩 (trachyte); 5—火山角砾岩 (volcanic breccia); 6—辉绿岩 (diabase); 7—凝灰岩 (tuff); 8—凝灰质泥岩 (tuffaceous mudstone); 9—砂泥岩 (sandstone mudstone)

沉积岩, 其中粗面岩和玄武岩分布最广. 图 2 是沙三段不同岩性测井电阻率散点图. 从图 1、2 可看出, 火成岩总体呈现高阻特征, 粗面岩电阻率远大于火山碎屑岩、玄武岩以及沉积岩. 归纳认为, 不同岩性电阻率特征表现为: 粗面岩>火山碎屑岩>玄武岩>沉积岩. 该统计结果为时频电磁反演识别出相对高阻储层提供了物性基础.

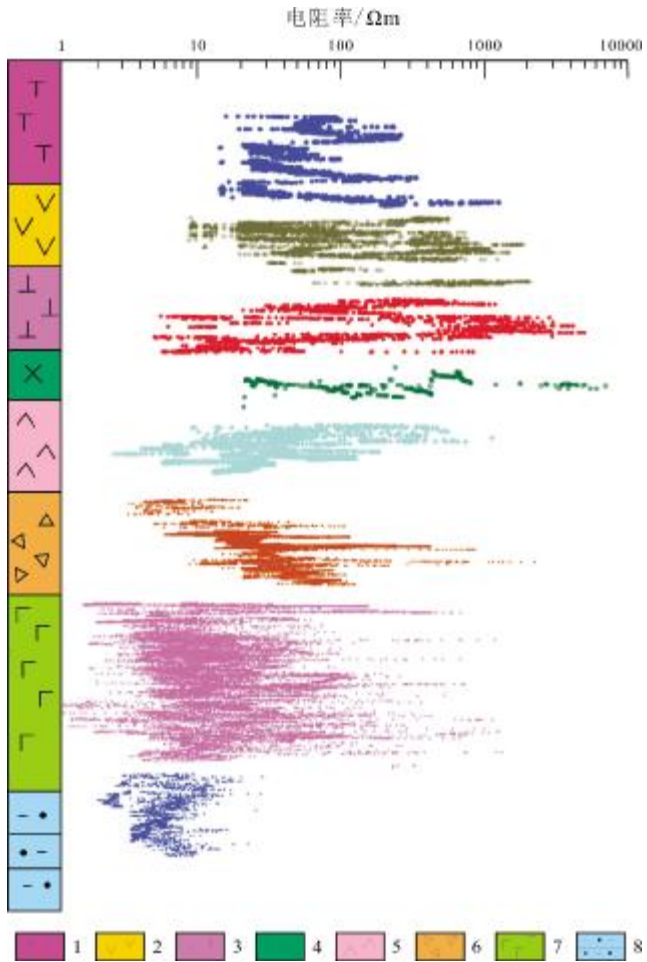


图 2 沙三段不同岩性测井电阻率散点图

Fig. 2 Logging resistivity scatter diagram of different lithology in E_{3s}
1—粗面岩(trachyte); 2—安山岩(andesite); 3—闪长岩(diorite); 4—辉绿岩(diabase); 5—凝灰岩(tuff); 6—角砾岩(breccia); 7—玄武岩(basalt); 8—碎屑岩(clastic rock)

2 针对火成岩目标的时频电磁技术

油气成藏后会引引起储集层周围及上方介质物理、化学和其他响应的异常, 特别是电异常和电化学异常, 这是电磁勘探的理论基础.

电磁勘探不是检测油气藏中的烃类成分, 而是直

接探测到了油气藏本身, 它通过探测油气藏的电和电化学异常来确定含油气状况, 因此电磁方法具有其他非震方法所不可比拟的优势. 时频电磁法的特点在于激发信号强, 形成对油气藏强而有效的激发, 因此, TFEM 是地面油气检测技术中最有潜力的方法之一.^[20-21]

针对深层火成岩目标, 时频电磁法采用大功率、长偏移距、多频采集方法, 提高了勘探深度和资料信噪比.

研究区浅层地震资料反射特征清晰, 但沙河街组及以下地层反射模糊, 深部目标识别困难. 采用大功率时频电磁能够探测到沙河街组及以下地层电性结构. 电磁法勘探是体积勘探, 自由反演存在多解性, 难以精确反演出目标界面和电阻率, 因而在反演过程中需尽可能利用先验信息, 减少未知反演参数, 提高深部目标区的反演精度. 在资料处理中, 为获得精确的电阻率成像, 开展了井震建模二维时频电磁约束反演.

图 3 为井震建模约束反演的流程图. 根据已知地

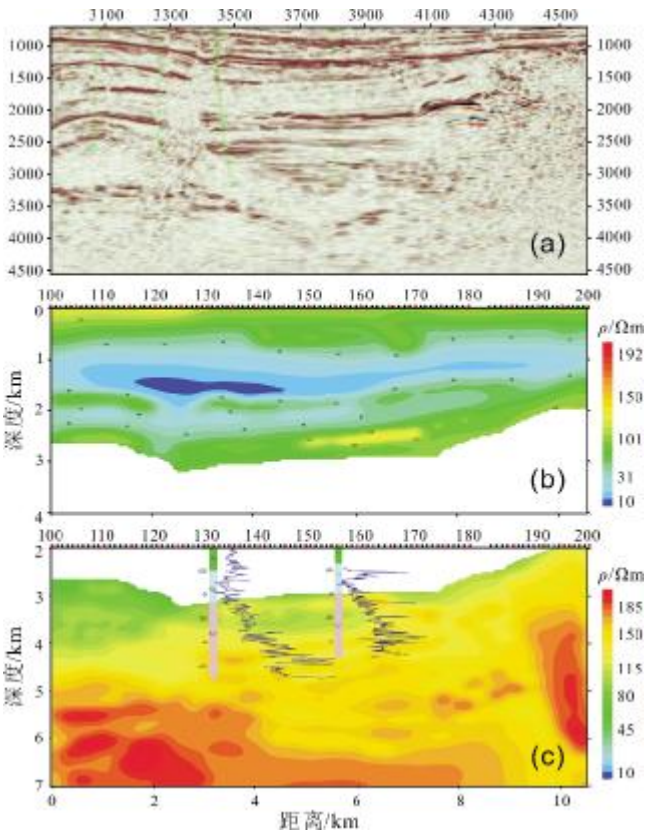


图 3 约束反演方法流程图

Fig. 3 Process of constrained inversion method

a—依据地震和钻井构建浅层模型(shallow model by seismic and drilling data); b—反演浅层地电模型电阻率(resistivity inversion of shallow magnetotelluric model); c—约束浅层反演深层地电模型(constrained inversion of deep magnetotelluric model)

质、钻井和地震浅层信息确定剖面初始地质模型浅层层位(图 1),再依据钻井统计物性结果给定电阻率值,然后反演浅层地电结构,经过多次迭代反演,找到最小拟合差,完成浅层反演(如图 3b)。最后固定浅层层位和电阻率值,重点反演深层地电结构,经多次迭代反演,寻找深部最小拟合误差,建立深层地电结构模型,最终得到时频电磁约束反演剖面(如图 3c)。

通过 W1 井、W9 井电性特征可以看出,从浅到深,电阻率的整体变化与测井曲线一致,细节清晰。说明通过地震层位约束,反演结果更精细。从整体上看,通过层位约束,目标层位归位良好,电性变化更符合地质认识。

3 深层火成岩储层分布特征

在 TFEM-03 线时频电磁约束反演电阻率剖面和地质解释剖面(图 4)中,沙河街组 5 个期次火山岩分别用 qc1、qc2、qc3、qc4、qc5 表示。从图 4 中可见,反演电阻率剖面不仅对断裂特征、隆拗格局、主要地层分界有揭示,对沙河街组内部的各种岩性也有较好的反映。依据前述物性统计结果和钻井资料,综合解释各时频电磁反演电阻率剖面,沙河街组共识别出 5 个期次火山岩,自下向上火山活动呈现“弱—强—强—弱—弱”特征。qc1、qc4、qc5 火山活动较弱,厚度自南西北东减薄;qc2、qc3 火山活动强、分布广、厚度大,粗面岩发育。

综合研究区 6 条时频电磁反演剖面,对 qc3 的两套粗面岩的厚度进行了推断解释(如图 5、6)。从图 5、6 看,受南北两个断裂带控制,沙三段主要发育 2 排火山喷发相带;粗面岩主要为溢流相和爆发相,火山口附近爆发相较发育。多条剖面及图 5 显示,粗面岩 I 发育深度 3.25~3.34 km,平面上有 2 排、3 个厚度中心,沿驾掌寺断裂发育一排, W2—W4 沿线发育一排, W5—W6 井间厚度超过 350 m。粗面岩 II 比粗面岩 I 分布范围更广,东部凹陷内基本均有分布,厚度更大,多为 300~600 m。从图 5、6 看,两套粗面岩呈 NE 向、条带状展布。在 W2 钻井附近新设一口钻井,钻探结果显示,该处火成岩发育,在沙三段有油气显示,与时频勘探结果较吻合。

4 研究区油气分布特征

通过对区内所有测线电阻率和极化率进行反演,极化率异常主要分布在东营组、沙一段和沙三段。通过分析钻井出油气情况,依据剖面上激发极化率异常数值大小,与已知钻井资料的对应关系,确立了本地区油气激发极化率异常分级评价模板(图 7)。

通过与已知探井的对比得出,研究区极化异常大于 0.2 时相对有利;振幅异常、相位异常和电阻率异常正相关性越好,则目标越有利。依据这个标准对 J34 井进行了预测,从极化率反演剖面(图 8)看, J34 井极化异常数值达 0.24,非常有利。

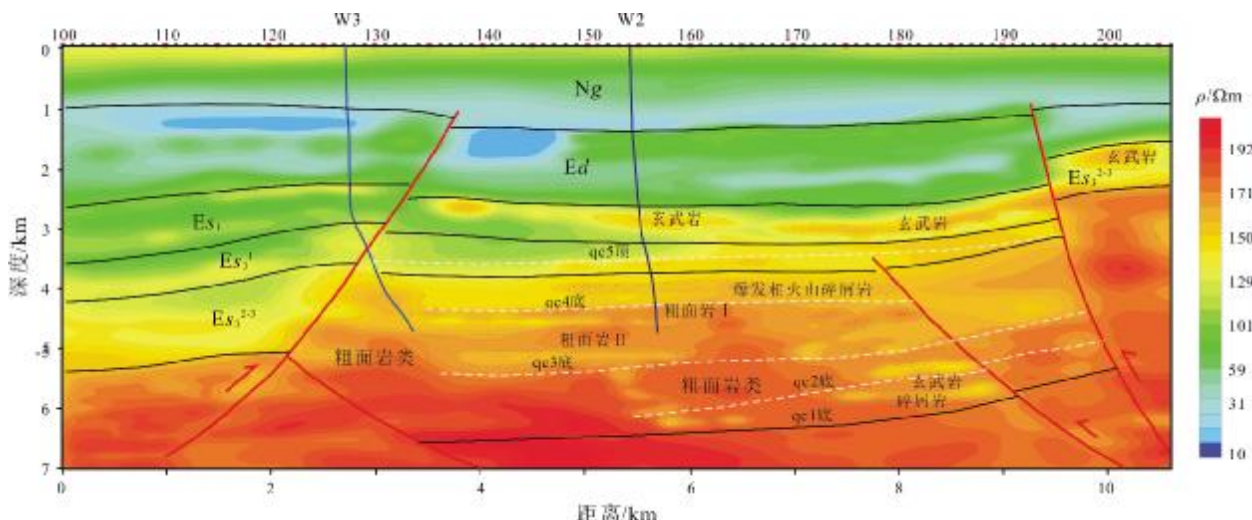


图 4 TFEM-03 线反演电阻率及综合解释剖面

Fig. 4 Resistivity inversion and comprehensive interpretation profile along TFEM-03 line

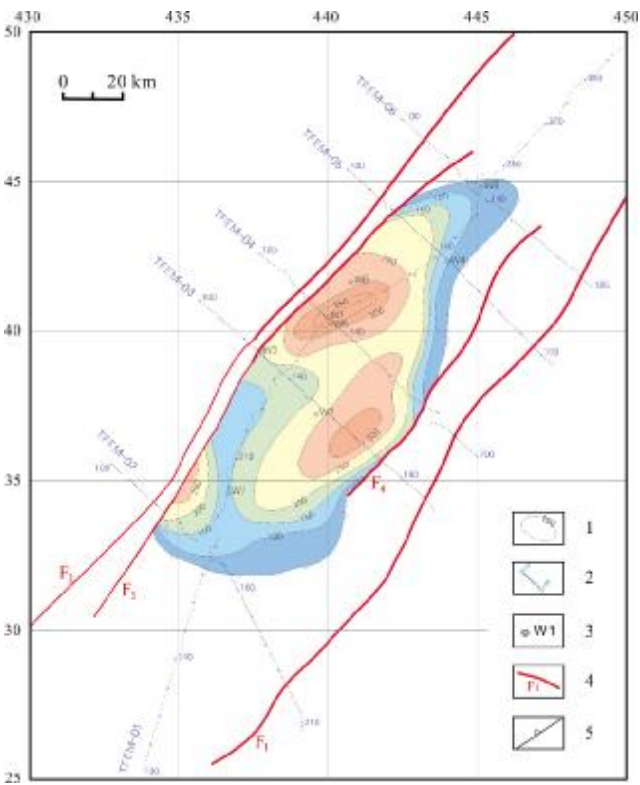


图 5 qc3 粗面岩 I 厚度分布图

Fig. 5 Thickness distribution of trachyte I in the third stage
1—厚度等值线(thickness contour); 2—时频测线(survey line of TFEM);
3—钻井(borehole); 4—断层(fault); 5—尖灭线(pinch-out line)

从电阻率反演剖面(图 9)上看,极化异常体所对应的位置,电阻率相对围岩呈明显高阻,解释为粗面岩,综合分析其为一级有利目标.后续油田对该井进行了试油,在 4 665~4 710 m 井段发现两段、累计厚度 45 m 的油层.

其他测线的极化异常特点与此类似. 2017TFEM-01 线极化率反演剖面(图 10)显示,高极化率异常主要分布在东营组和沙一段. 东营组内有两个强极化异常, 130—166 号测点之间的异常体长度约 3.6 km,极化异常值 0.19~0.23, 174—198 号测点之间的异常体长度约 2.4 km,极化异常值 0.19~0.22,两个异常疑似联通. 对应地震剖面和电阻率反演剖面显示, 东营组这两个极化异常与有利构造叠合得非常好,异常体刚好位于背斜顶部及背斜翼部之上. 综合各评价指标分析,将其评价为一级有利目标.

沙一段内有 3 个强极化异常. 其中 143—167 号测点之间的异常位于沙一段的顶部,长度约 2.4 km,

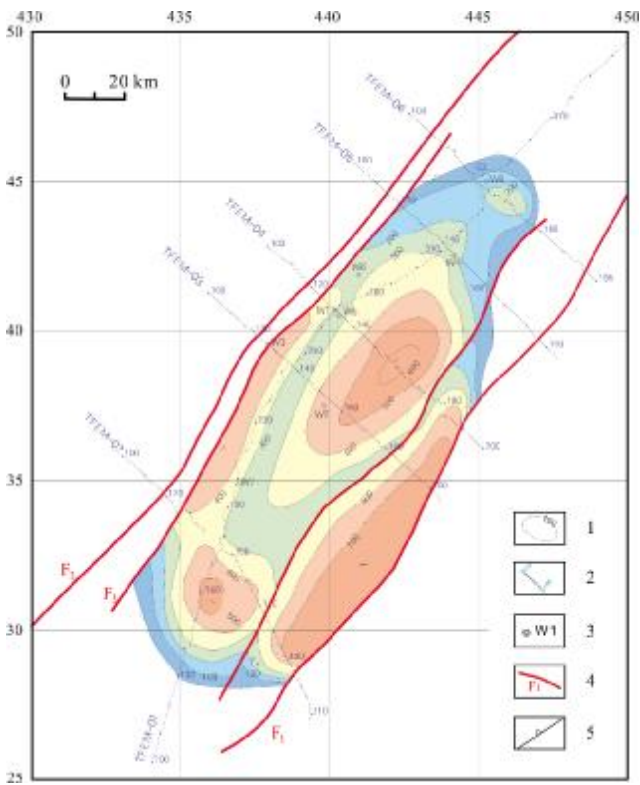


图 6 qc3 粗面岩 II 厚度分布图

Fig. 6 Thickness distribution of trachyte II in the third stage
1—厚度等值线(thickness contour); 2—时频测线(survey line of TFEM);
3—钻井(borehole); 4—断层(fault); 5—尖灭线(pinch-out line)

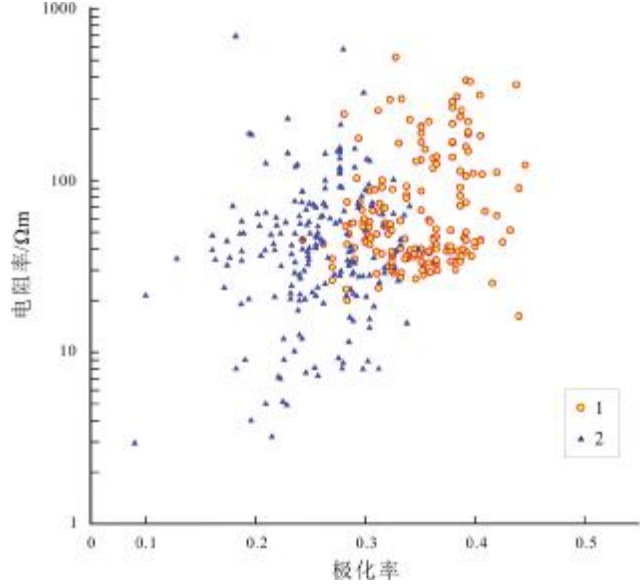


图 7 极化率分级评价统计散点图

Fig. 7 Scatter diagram of polarization anomaly
grading evaluation
1—工业油气井(commercial oil-gas well); 2—水井和干井(water and
dry wells)

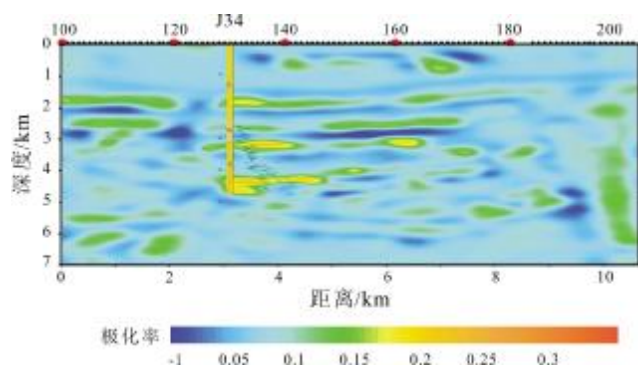


图8 TFEM-04 测线极化率剖面

Fig. 8 Polarizability profile along TFEM-04 line

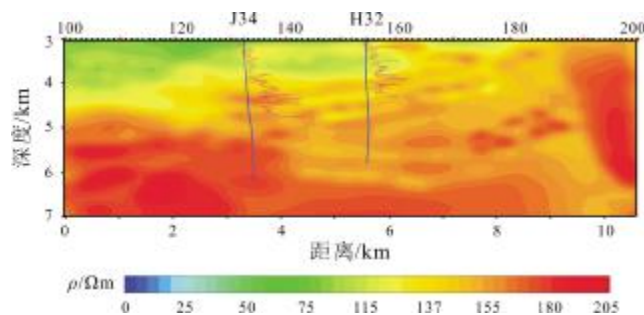


图9 2016TFEM-04 测线电阻率剖面

Fig. 9 Resistivity profile along 2016TFEM-04 line

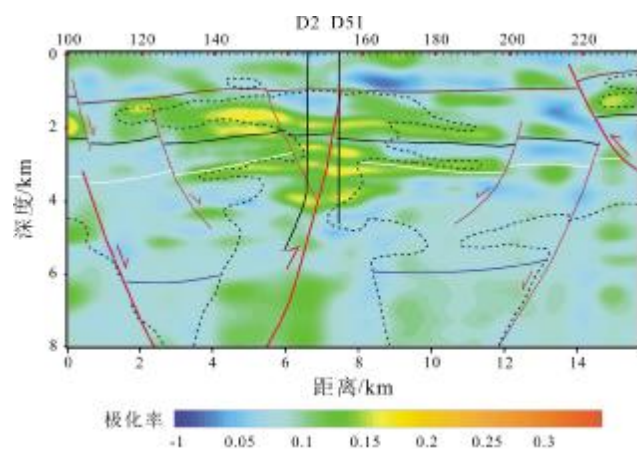


图10 2017TFEM-01 测线极化率剖面

Fig. 10 Polarizability profile along 2017TFEM-01 line

极化异常值 0.19~0.23; 134—162 号测点之间的异常位于沙一段的底部接近沙三段顶的位置,长度约 2.8 km,极化异常值 0.19~0.21; 173—191 号测点之间的异常也是位于沙一段的底部接近沙三段顶的位置,长度约 1.8 km,极化异常值 0.19~0.21. 综合各评价指标分析,将其评价为一级有利目标。

5 结论

通过分析电测井资料,建立了研究区的火成岩物性数据库,为时频电磁勘探识别高阻粗面岩和相对低阻的玄武岩提供了物性基础。时频电磁反演电阻率剖面所揭示的电性结构能有效识别新生界各主要地层,井震-时频联合,进一步落实构造特征,对沙河街组火成岩内幕刻画更清晰。通过综合解释揭示 HX 地区沙三段粗面岩广泛发育,主要为溢流相和爆发相,认为爆发相的粗面岩厚度大、分布广,勘探潜力大。通过时频电磁勘探提高了对火成岩储层的识别精度,在类似复杂火山岩勘探领域具推广价值。

反演极化率异常对研究区油气分布有较好的揭示。区内纵向上发育多层极化异常,DPF 地区主要分布在东营组和沙一段。

大功率时频电磁勘探实现了电阻率-极化率参数联合直接油气检测,解决了单一电阻率参数储层目标及油水识别精度低的难题,是一种行之有效的油气预测方法。

参考文献(References):

- [1]张丽华,潘保芝,单刚义.测井曲线概率分布法识别四川盆地火山岩气水层[J].地质与资源,2022,31(1):115-120,114.
Zhang L H, Pan B Z, Shan G Y. Identification of gas-water zones in volcanic reservoirs in Sichuan Basin based on probability distribution of logging curves[J]. Geology and Resources, 2022, 31(1): 115-120, 114.
- [2]张文浩,王丹丹,李世臻,等.重磁电勘探在黑龙江三江盆地石炭系一二叠系油气地质调查中的应用[J].中国地质,2019,46(1):191-201.
Zhang W H, Wang D D, Li S Z, et al. The application of gravity-magnetic-electric prospecting engineering for Carboniferous-Permian petroleum geological survey in Sanjiang Basin, Heilongjiang Province [J]. Geology in China, 2019, 46(1): 191-201.
- [3]卢进才,张洪安,牛亚卓,等.内蒙古西部银额盆地石炭系一二叠系油气地质条件与勘探发现[J].中国地质,2017,44(1):13-32.
Lu J C, Zhang H A, Niu Y Z, et al. Carboniferous-Permian petroleum conditions and exploration breakthrough in the Yingen-Ejin Basin in Inner Mongolia[J]. Geology in China, 2017, 44(1): 13-32.
- [4]徐礼贵,夏义平,刘万辉.综合利用地球物理资料解释叠合盆地深层火山岩[J].石油地球物理勘探,2009,44(1):70-74,97.
Xu L G, Xia Y P, Liu W H. Integrative application of geophysical prospecting data to interpret deep volcanic rock in superposed basin [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2009, 44(1): 70-74, 97.

- [5] 杨辉, 宋吉杰, 文百红, 等. 火山岩岩性宏观预测方法——以松辽盆地北部徐家围子断陷为例[J]. 石油勘探与开发, 2007, 34(2): 150–155, 196.
- Yang H, Song J J, Wen B H, et al. Macroscopic prediction of volcanic rock lithology: A case from Xujiaweizi faulted depression, northern Songliao Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2007, 34(2): 150–155, 196.
- [6] 胡金祥, 李宗杰, 张永升, 等. 准噶尔盆地东缘火山岩综合地球物理勘探[J]. 新疆地质, 2013, 31(1): 107–112.
- Hu J X, Li Z J, Zhang Y S, et al. The integrated geophysical exploration for the northeast edge volcanic rock in Junggar Basin[J]. Xinjiang Geology, 2013, 31(1): 107–112.
- [7] 张长江, 李志明, 何毅, 等. 固定源建场测深法在准噶尔盆地南缘的勘探试验[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(3): 275–277.
- Zhang C J, Li Z M, He Y, et al. Application of fixed source field sounding to petroleum prospecting in southern margin of Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(3): 275–277.
- [8] 刘云祥, 何毅, 李德春, 等. 利用高精度重磁电勘探资料识别火成岩储层相带[J]. 石油地球物理勘探, 2005, 40(S1): 99–101.
- Liu Y X, He Y, Li D C, et al. Identification of volcanic reservoir facies belt using high-precision gravity, magnetic and electrical exploration data[J]. Petroleum Geophysical Exploration, 2005, 40(S1): 99–101.
- [9] 刘云祥, 何展翔, 张碧涛, 等. 识别火成岩岩性的综合物探技术[J]. 勘探地球物理进展, 2006, 29(2): 115–118.
- Liu Y X, He Z X, Zhang B T, et al. Integrated geophysical techniques for identification of igneous rocks[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2006, 29(2): 115–118.
- [10] 陈正乐, 马寅生, 王小凤, 等. 辽河盆地新生代构造演化模式[J]. 地质力学学报, 1999, 5(2): 83–89.
- Chen Z L, Ma Y S, Wang X F, et al. Dynamic model of the Cenozoic tectonic evolution of the Liaohe Basin[J]. Journal of Geomechanics, 1999, 5(2): 83–89.
- [11] 王岩泉, 胡大千, 蔡国刚, 等. 辽河盆地东部凹陷火山岩储层特征与主控因素[J]. 石油学报, 2013, 34(5): 896–904.
- Wang Y Q, Hu D Q, Cai G G, et al. Characteristics and controlling factors of Cenozoic volcanic reservoirs in Liaohe Basin, NE China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(5): 896–904.
- [12] 张占文, 陈永成. 辽河盆地东部凹陷天然气盖层评价[J]. 沉积学报, 1996, 14(4): 102–107.
- Zhang Z W, Chen Y C. Caprock evaluation of natural gas reservoir within the eastern depression, Liaohe rift[J]. Acta Petrolei Sinica, 1996, 14(4): 102–107.
- [13] 宗文明, 孙求实, 郜晓勇, 等. 辽西拗陷凌源地区洪水庄组烃源岩石油地质特征及生烃潜力[J]. 地质与资源, 2022, 31(2): 165–174, 192.
- Zong W M, Sun Q S, Gao X Y, et al. The source rocks of Hongshuizhuang Formation in Lingyuan area of Liaoxi depression: Petroleum geology and hydrocarbon generation potential[J]. Geology and Resources, 2022, 31(2): 165–174, 192.
- [14] He Z X, Hu W B, Dong W B. Petroleum electromagnetic prospecting advances and case studies in China[J]. Surveys in Geophysics, 2010, 31(2): 207–224.
- [15] He Z X, Yu G, Liu H Y. Drilling-risk assessment with joint electromagnetic and seismic data[J]. The Leading Edge, 2014, 33(8): 876–880.
- [16] 王志刚, 何展翔, 覃荆城, 等. 时频电磁技术的新进展及应用效果[J]. 石油地球物理勘探, 2016, 51(S1): 144–151.
- Wang Z G, He Z X, Qin J C, et al. Advances of TFEM technique and its application[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(S1): 144–151.
- [17] 沈义斌, 杨俊, 曹阳, 等. 基于频散测试分析的时频电磁资料校正处理及储层评价[J]. 地质与资源, 2022, 31(3): 404–411.
- Shen Y B, Yang J, Cao Y, et al. Time-frequency electromagnetic data correction processing and reservoir evaluation based on dispersion test analysis[J]. Geology and Resources, 2022, 31(3): 404–411.
- [18] Dong W B, Zhao X M, Liu F, et al. The time-frequency electromagnetic method and its application in western China[J]. Applied Geophysics, 2008, 5(2): 127–135.
- [19] 索孝东, 张生, 陈德炎. 用重磁电异常信息模式识别石炭系火山岩岩性——以准噶尔盆地陆东地区为例[J]. 新疆石油地质, 2011, 32(3): 318–320.
- Suo X D, Zhang S, Chen D Z. Identification of the carboniferous volcanic lithology with gravitational-magnetic-electric abnormal information pattern: An example from eastern Luliang uplift area in Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2011, 32(3): 318–320.
- [20] 何展翔. 圈定油气藏边界的井地电法研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2006.
- He Z X. Research to borehole-surface electromagnetic technique: A new way of mapping reservoir boundary [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2006.
- [21] He Z X, Liu X J, Qiu W T, et al. Mapping reservoir boundary by borehole-surface TFEM: Two case studies[J]. The Leading Edge, 2005, 24(9): 896–900.