

重磁电(井)震综合物探技术在识别达巴松凸起 石炭系深部火山岩中的应用

卞保力¹⁾, 江梦雅¹⁾, 王学勇¹⁾, 张 生²⁾,
蒋中发¹⁾, 刘海军²⁾, 齐 松²⁾

1) 中国石油新疆油田公司勘探开发研究院, 新疆克拉玛依 834000;

2) 中国石油东方地球物理公司综合物化探处, 河北涿州 072751

摘 要: 近年来, 准噶尔盆地石炭系火山岩勘探屡获突破, 展现了火山岩储层良好的勘探前景。由于准噶尔盆地石炭系火山岩存在埋藏深度大, 受勘探手段和地球物理资料品质等因素的制约, 深层火山岩的识别与解释目前仍存在诸多困难和问题, 为油田地震勘探工作带来了极大困难。如何通过现有物探方法和技术提高深部火山岩的分辨、识别能力, 具有很强的理论和实际意义。由于特殊地质体在密度、磁化率或电阻率等物性组合方面存在特殊性, 因此可通过多方法综合物探技术对其进行综合识别、限定。本文在深入分析达巴松凸起钻井、物性资料的基础上, 利用重磁电异常信息模式判别技术, 预测了石炭系火山岩的平面展布, 缩小和锁定了深层火山岩地震勘探的有利靶区; 再以地震相分析、地震属性解释、构造制图及综合评价为主要技术手段, 对深层火山岩进行定量识别和预测, 落实和优选了深层火山岩有利勘探目标, 并取得了良好效果。总结了深层特殊地质体勘探的高精度地震资料采集和重磁电震(井)综合应用、联合反演解释等手段, 极大地提高了准噶尔盆地深层火成岩的勘探精度。

关键词: 重磁电异常; 地震相分析; 石炭系; 火山岩; 达巴松凸起; 联合反演; 岩性识别

中图分类号: P618.13; P631 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.060201

Application of Integrated Exploration Based on Gravity, Magnetic, Magnetotelluric, Well, and Seismic Properties in the Identification of Deep Volcanic Rocks of Carboniferous in Dabasong Uplift

BIAN Bao-li¹⁾, JIANG Meng-ya¹⁾, WANG Xue-yong¹⁾, ZHANG Sheng²⁾,
JIANG Zhong-fa¹⁾, LIU Hai-jun²⁾, QI Song²⁾

1) Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Xinjiang Oil field Company, Karamay, Xinjiang 834000;

2) Integrated Geophysical Exploration Department, PetroChina Oriental Geophysical Company, Zhuozhou, Hebei 072751

Abstract: In recent years, the exploration of volcanic rocks of Carboniferous in Junggar basin repeatedly made breakthroughs, and volcanic reservoir shows a good prospect. Owing to restricting factors such as burial depth, exploration methods, and quality of geophysical data, the identification and characterization of deep volcanic rocks of Carboniferous in Junggar basin remains controversial, making seismic exploration difficult in oil field. Therefore, improving the resolution and identification of deep volcanic rocks using existing geophysical exploration methods is of great theoretical and practical significance. Moreover, they can be identified and defined using integrated geophysical exploration, owing to the density, magnetic, resistivity, or other physical properties of special geological bodies. After analyzing well and physical properties, the plane distribution of Carboniferous volcanic rocks in Dabasong uplift is predicted based on gravity, magnetic, and electronic anomaly, and the

本文由中国石油天然气股份公司“十四五”重大前瞻性基础性重大科技项目“陆相深层超深层油气富集规律与勘探评价技术研究”(编号: 2021DJ0206)资助。

收稿日期: 2021-10-08; 改回日期: 2022-05-25; 网络首发日期: 2022-06-07。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 卞保力, 男, 1983 年生。硕士, 工程师。主要从事油气地质与勘探研究。E-mail: bbaoli@petrochina.com.cn。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

favorable target area for seismic exploration of deep volcanic rocks is confirmed. The deep volcanic rocks are quantitatively identified and predicted using seismic facies analysis, seismic attribute interpretation, structure mapping, and comprehensive evaluation. In this study, we summarize the high precision seismic data acquisition; the integrated application of gravity, magnetic, electric, and seismic methods; and the joint inversion of deep special geological bodies. This study improves the precision of exploration of deep volcanic rocks in Junggar basin.

Key words: gravity magnetoelectric anomalies; seismic facies analysis; Carboniferous; volcanic rocks; Dabasong uplift; joint inversion; lithology recognition

近年来,准噶尔盆地深层火山岩勘探屡获突破,展现了火山岩储集体的良好勘探前景(何文军, 2019; 张磊等, 2019; 苏东旭等, 2020; 黄芸等, 2020)。准噶尔盆地历经了多期构造运动与演化,早期裂谷或断陷阶段一般发生过多期强烈的岩浆活动,保存了众多的深层火山岩。在经过风化作用后,火山岩比相同埋深的其他岩类具有更加优越的储集性能,在合适的石油地质条件下有利于天然气体的富集,从而形成大规模的天然气藏(毛翔等, 2012; 张磊等, 2019)。达巴松凸起周缘石炭系发育大套火山岩,岩相特征为玄武岩、安山岩、火山角砾岩及少量火山碎屑岩等,其中以安山岩为主的火山熔岩主要以溢流相形式大面积持续喷发,造成火山岩叠置发育,表现为地震响应特征复杂,火山岩内部反射杂乱,各火山岩界面特征不明显(阿布力米提等, 2019; 李宗浩等, 2021)。针对达巴松凸起周缘火山岩储层地质特点,在深入分析达巴松凸起钻井、物性资料的

基础上,利用重磁电异常信息模式判别技术,预测了石炭系火山岩的平面展布,缩小和锁定了深层火山岩地震勘探的有利靶区;再以地震相分析、地震属性解释、构造制图及综合评价为主要技术手段,对深层火山岩进行定量识别和预测,落实和优选了深层火山岩有利勘探目标,总结了深层特殊地质体勘探的综合物探技术的识别方法,认清了火山岩相分布规律及特点,进而预测了本区火山岩有利储层分布,极大提高了火山岩气藏的描述精度,对准噶尔盆地油气勘探具有重要的指导意义。

1 研究区概况

准噶尔盆地达巴松凸起南、北两侧毗连盆1井西凹陷和玛湖凹陷两大富烃凹陷,东西两侧以中拐凸起及夏盐凸起为界(图1)。该凸起经过石炭纪的隆起抬升及早二叠世早期剥蚀作用,玛湖凹陷区与盆1井西凹陷区沉积明显厚于达巴松凸起区。受构造

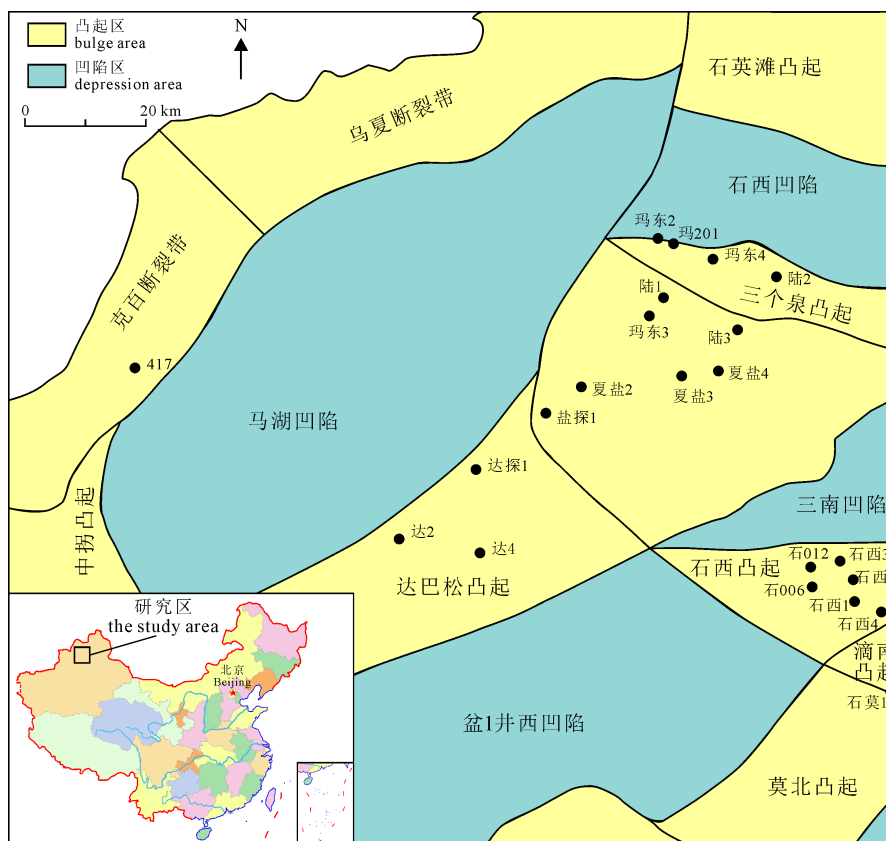


图1 达巴松凸起构造位置图

Fig. 1 Simplified tectonic sketch map showing the location of Dabasong uplift

活动的影响,研究区总体表现为南西倾,局部发育大型背斜构造,深、浅断裂发育,不同期次形成的断裂直接控制着该区构造形态及油气运移。同时,深层发育玄武岩、安山岩、火山角砾岩及少量火山碎屑岩等。以安山岩为代表的火山熔岩以溢流相的形式大面积连续喷发,导致火山岩叠置发育,进而在地震上表现为火山岩内部杂乱反射,火山岩边界不明显等反射特征。基于以上两大控凸、控藏因素,精细刻画断裂及预测火山岩岩相及平面展布显得尤为重要。

准噶尔盆地达巴松地区自上而下发育的地层为:第四系(Q)、新近系、古近系、白垩系东沟组(K₂d)、吐谷鲁群(K₁tg)、侏罗系头屯河组(J₂t)、侏罗系西山窑组(J₂x)、侏罗系三工河组(J₁s)、侏罗系八道湾组(J₁b)、三叠系、二叠系和石炭系,石炭系为达巴松地区主要火山岩发育层位。

2 研究区火山岩综合响应特征

2.1 火山岩相重、磁、电响应特征识别、提取

特殊地质体在密度、磁化率或电阻率等物性组合方面往往存在特殊性,可通过多方法综合物探技术对其进行综合识别、提取(冯玉辉等, 2016; 张楠等, 2019; 代春梦等, 2019; 周惠等, 2019)。据此我们通过详细分析研究区不同类型火山岩的物性(密度、磁化率和电阻率)特征,及其相应的重、磁、电等物探异常组合,对达巴松凸起火山岩分布进行了识别和提取。

首先,结合达巴松凸起岩屑标本测定和测井资料统计,系统整理了达巴松凸起及周缘石炭系地层钻井岩心的密度、磁性和电阻率结果,在此基础上确定了石炭系地层的物性组合特征(表 1)。由此,可以将研究区不同岩性在平面上的发育和展布进行识别和划分。

通过对研究区不同岩性的重、磁、电性特征的归纳,可以较为明确的归纳出研究区不同岩性综合物探异常的组合特征:①石炭系砂岩和泥岩等表现为中高密度和弱磁性;②基性火成岩岩性表现为高

密度和强磁性;③安山岩、英安岩和火山角砾岩表现为中等密度和中强磁性;④凝灰岩和霏细岩表现为低密度和弱磁性。综合利用上述综合物探异常的组合特征,就可以较好地区分研究区内基性岩、中酸性岩、凝灰岩和砂泥岩等石炭系基岩的空间展布。缩小和锁定深层火山岩地震勘探的有利靶区,为进一步开展深层火山岩定量识别和预测提供基础。

2.2 火山岩相地震响应特征分析

除重、磁、电综合异常特征外,火山岩在地震剖面上同样存在明显的响应特征,主要表现为剖面上的上小下大丘状特征,在水平切片上与围岩之间明显呈“环状-密集-杂乱”特征(张志让等, 2011)。火山地质体侧翼具有超覆形态,反射轴向火山岩圈闭顶端尖灭,上部地层具有披覆特征,中间薄两侧加厚。而不同火山岩岩相及岩性组合有不同的地震响应特征,根据全区多口探井的井震联合分析结果,可以建立达巴松凸起石炭系火山岩储层地震响应识别模式。

(1)安山岩: 喷溢相,表现为中-弱振幅、中-低频率、连续性差,随火山角砾增加振幅逐渐增强、波形逐渐杂乱;

(2)玄武岩: 溢流相,表现为似层状、中等-强振幅、连续反射特点;

(3)火山角砾岩: 爆发相,位于火山通道附近,表现为中振幅、连续性差、中-低频率、杂乱或空白反射等特点;

(4)火山碎屑岩: 火山沉积相,表现为弱振幅、连续性好、低频、层状-平行反射等特点。

本次研究根据巴松凸起及北部玛湖凹陷周缘的火山岩井震特征与重磁电异常形态,在重磁电异常资料识别火山岩区域的基础上,利用火山岩井震特征,通过对已有井标定,在地震剖面上清晰地划分出了不同火山岩相带的类型及分布(表 2)。主要包括:①爆发相: 岩性主要以火山角砾岩为主。②溢流相: 岩性主要以安山岩、玄武岩为主,含少量流纹岩。③火山沉积相: 岩性以沉凝灰岩及凝灰岩为主。

表 1 达巴松凸起周缘石炭系岩石物性特征一览表

Table 1 Petrophysical characteristics of the Carboniferous around the Dabasong uplift

岩石类型	密度/(g/m ³)	磁化率/(10 ⁻⁵ SI)	电阻率/(Ω·m)	综合物性特征
玄武岩	2.70	850 ~ 2 000	700 ~ 5000	高密度、高磁化率与高阻组合
辉绿岩	2.72	900 ~ 2 500	500 ~ 1500	高密度、高磁化率与相对高阻组合
安山岩	2.54	220 ~ 400	100 ~ 300	中低密度、中等磁化率与中低阻组合
英安岩、流纹岩	2.50	200 ~ 400	100 ~ 250	中低密度、中等磁化率与中低阻组合
火山角砾岩	2.54	454 ~ 1 000	20 ~ 70	中低密度、中高磁化率与低阻组合
凝灰岩	2.44	120 ~ 250	10 ~ 70	低密度、中低磁化率与低阻组合
砂岩	2.57	20 ~ 40	5 ~ 20	中低密度、低磁化率与低阻组合
泥岩	2.56	10 ~ 30	1 ~ 10	中低密度、低磁化率与低阻组合

3 火山岩综合识别技术的应用

3.1 高精度重、磁、电综合解释及其对火山岩区的识别

本次研究的高精度重、磁资料处理和综合解释是在综合分析认识其它物探、地质、钻井等资料基础上,以地层岩石密度、磁化率变化特征为基础,应用异常分离技术等数据处理手段,从重力异常和磁力 ΔT 异常中提取具有特定地质意义的异常信息,从而剥离得到反映石炭系地层特征的重、磁异常资料图件(图 2a, b)。从重力剩余异常图上来看,火山岩区发育在达巴松、夏盐凸起重力高带,主要位于玛东 3—夏盐 2 井—达探 1 井一带。异常特点是重力高整体呈北东东走向,异常值变化范围一般在 $0\sim 1.29\times 10^{-5}\text{ ms}^{-2}$ 之间,对应中基性喷发岩、火山碎屑岩等。达巴松凸起重力高带位于工区南部及陆西工区交界处,整体呈近东西向展布,对应中基性、中酸性喷发岩及火山碎屑岩等。从重力剩余异常图上来看,夏盐凸起、达巴松凸起中-弱磁异常带呈宽缓的低频正磁异常特征展布,结合钻井分析,引起这些正磁异常的主要为石炭系中基性、中酸性喷发岩。

时频电磁资料在纵向上可以比较清晰地反映火山岩与其它岩性的差异,可以对地下地层的深度、发育形态及展布特征有明显的反映(李燕丽等, 2016; 王志刚等, 2016; 何展翔等, 2020)。根据达巴松凸起周缘部署的三条高精度建场测深精细处理,可以从电阻率高低判断火山岩的发育区域,其中红色区域高阻部分为火山岩的发育区,其余浅色为沉积岩或者火山碎屑岩的发育区(图 2c)。

在平、剖面划分约束基础上,利用三维重力与三维磁力反演方法,结合测井约束标定进一步确定异常体三维空间展布(张楠等, 2016; 周月等, 2021; 张铭哲等, 2021)。三维重磁物性层序反演法是依据重磁异常特征将平面异常场按等级进行划分,形成对应的约束系数,实施三维密度或三维磁化率反演,获得三维物性分布,以刻画地下地质体特征。井约

束三维重磁物性层序反演法是在三维重磁物性层序反演法的基础上加进井约束条件,将已知先验信息加入到反演模型中,对反演过程进行约束,使得反演结果更加符合地下实际地质情况。从本次井约束三维重磁物性层序反演密度、磁化率结果来看(图 3),基本反映了研究区密度、磁化率的三维空间展布形态。

3.2 火山机构识别技术

火山口控制着火山体和火山岩相分布,明确火山口位置是寻找有利相带的关键依据。在高精度重、磁确定的有利火山岩发育带上,在通过高精度三维地震震相拾取、分析对火山机构的形态进行刻画,可获得研究区火山机构及火山口的详细特征(张楠等, 2016; 李坤白等, 2017; 代春萌等, 2019)。首先,通过磁力垂直二次导数异常图、剩余磁力异常图判断火成岩发育区带,研究石炭系总体火成岩分布特征(图 4a)。然后,在磁力三维反演基础上,结合时频电磁资料、重磁电震反演剖面提取出石炭系剩余磁力异常图,预测石炭系火成岩分布情况、识别火山口存在部位,火山口在磁异常图上的表现往往为等轴状或椭圆状的圈闭磁力高,个别火山口由于后期剥蚀较为严重,异常圈闭形状稍有改变,串珠状磁力高往往是沿基底大断裂展布的火山口的反映。本区主要有两类磁力异常,一类为高频磁力异常,呈等轴状、带状展布,根据火山活动机制及岩石物性参数判别其为火成侵入岩的反映;另一类为中低频磁力异常,依据火山喷发岩所引起的磁力异常特征,判别主要为火山喷发岩的反映。

岩浆熔穿围岩所形成的“山根”是识别火山通道以及确定火山口位置的重要依据。深大基底断裂控制着火山口分布,断裂与火成岩关系密切,火山口控制岩相及岩体分布。但由于火山爆发时形成许多断裂,火山体反作用力使其顶部变换成水平张力,上覆地层形成“地堑、半地堑”的断裂特征,因此火山口反射特征与密集断裂反射特征混在一起。在研究中有针对性的应用构造导向滤波(图 4b),得到

表 2 达巴松凸起及玛湖凹陷火山岩井震响应特征及重磁电性异常
Table 2 Characteristics of well-seismic and gravity-magnetic-electronic anomaly of volcanic rocks of Dabasong uplift and Mahu sag

岩相	地震响应特征	测井曲线特征	重力异常	磁力异常	电阻率
爆发相 (火山口相)	丘状加厚、同向轴呈现强弱相间突变, 杂乱不连续、振幅强弱相间反射	自然伽马值高值, 曲线锯齿化, 高幅度; 低阻抗值	强	中强磁力正异常	低
溢流相 (近火山口相)	似层状、中等-强振幅、连续反射	自然伽马值变化小、锯齿变化程度小; 阻抗值为中低阻、中阻	中等	中等正异常	中高
火山沉积相 (远火山口相)	层状、弱振幅、连续反射	自然伽马曲线呈高值锯齿-齿状; 双侧向曲呈中高值齿状或低幅齿化箱状	负异常	高频负异常	低

相对准确的火山口检测成果。通过地层体切片、相干体切片分析方法,发现达巴松地区发育多个较为典型的火山口,表现为多个非线性团状和扇状外形,预测为火山岩机构发育带。由图 4b 可以清楚地识别火山岩喷发的中心部位,在石炭系反射层处形成近似圆形的地震反射异常,在相干切片上表现为裂缝高度发育区。

3.3 火山岩岩相带的划分技术

火山岩在地震剖面 and 水平切片上的外部几何形态、内部反射结构和振幅、频率、连续性等参数

特性,是火山岩地震相的直观反映。根据邻近区域已钻标志性探井的分析,结合井震综合标定后,最终确定出了研究区及其附近区域石炭系综合特征为:①爆发相火山岩,以夏盐 1 井为代表,其测井曲线特征为自然伽马值高值,曲线锯齿化,高幅度。地震响应特征为丘状加厚、同向轴呈现强弱相间突变,杂乱不连续、振幅强弱相间反射,重力异常高、中强磁力、中低电阻率异常;②溢流相火山岩,以夏盐 2 井为代表,其测井曲线特征为自然伽马值变化小、锯齿变化程度小,双侧向曲线数值小。地震

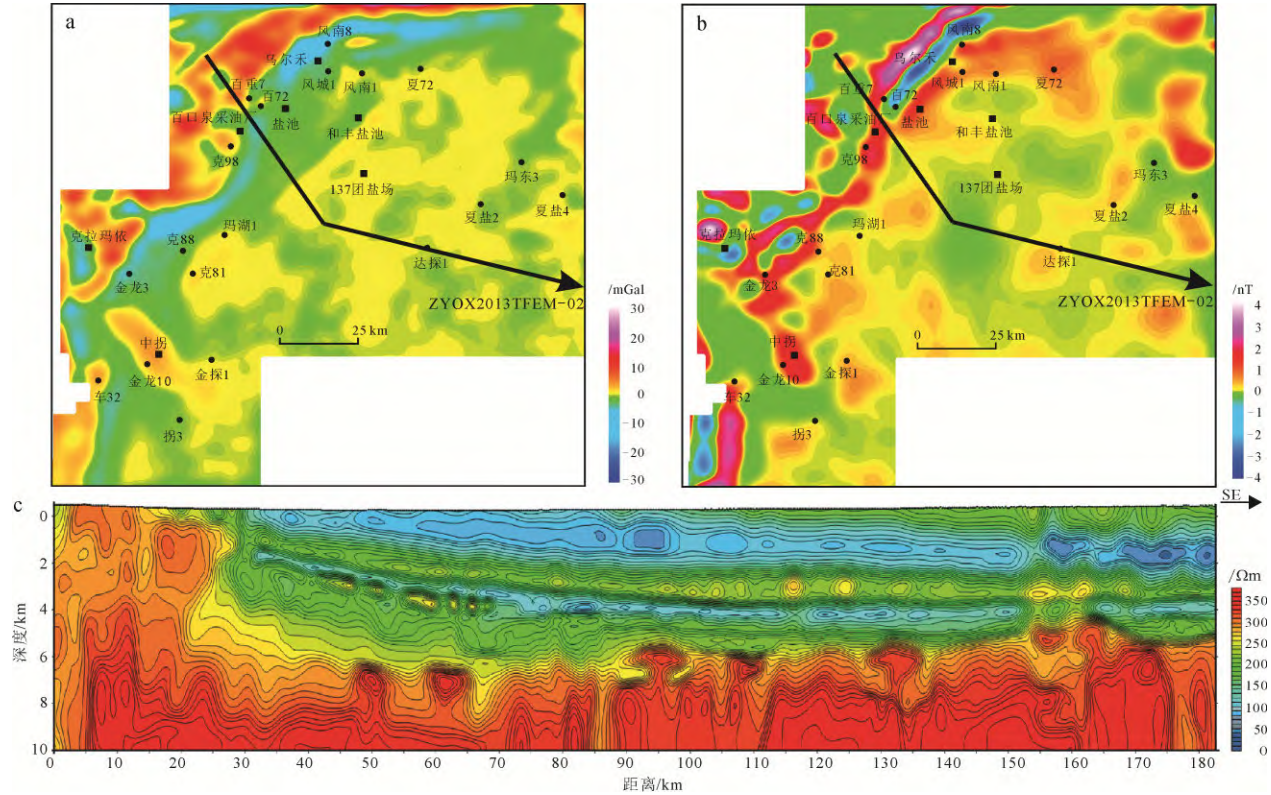


图 2 准噶尔盆地达巴松凸起周缘剩余重力异常(a)、剩余磁力异常(b)和 ZYOX2013TFEM-02 测线电阻率反演剖面(c)

Fig. 2 Residual gravity anomaly (a), residual magnetic anomaly (b) and the resistivity inversion profile of ZYOX2013TFEM-02 (c) around the Dabasong uplift in Junggar basin

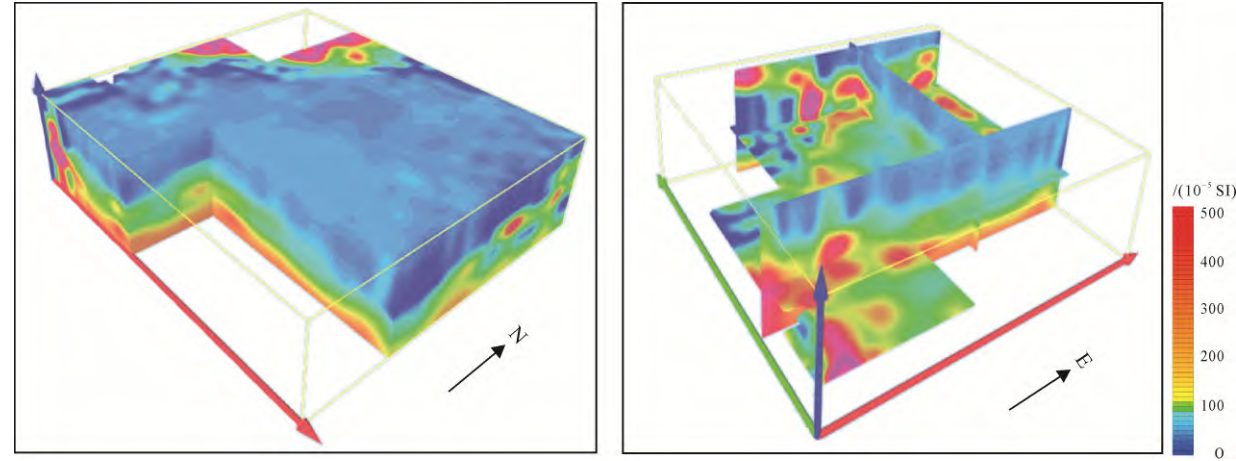


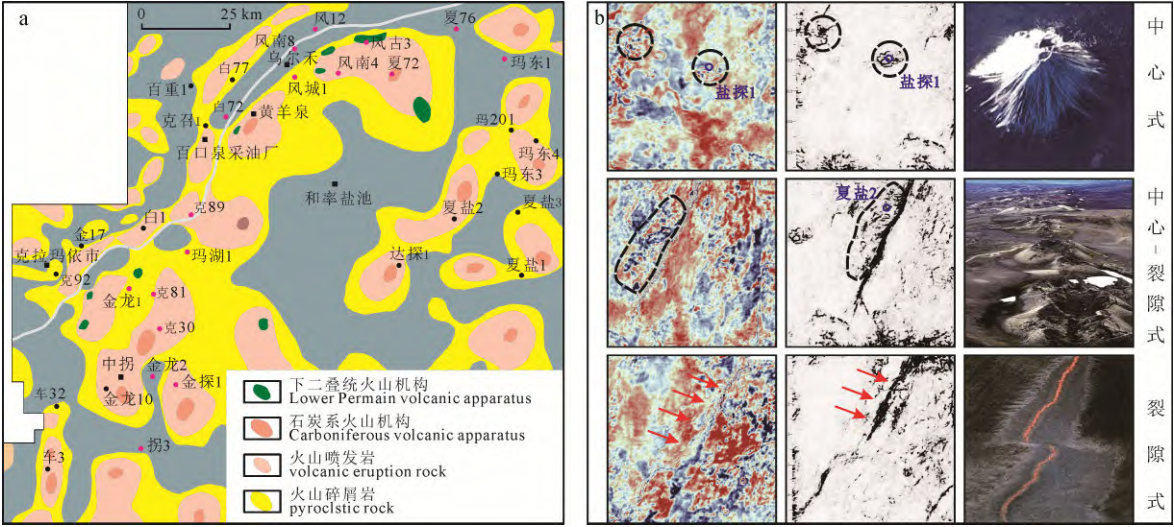
图 3 准噶尔盆地达巴松凸起周缘三维磁化率体及磁化率切片图

Fig. 3 3-D magnetic susceptibility bodies and magnetic susceptibility sections around the Dabasong uplift in Junggar basin

响应特征为似层状、中等-强振幅、连续反射，重力异常高、强磁、高电阻率异常；③火山沉积相火山岩，以莫深 1 井为代表，其测井曲线特征为自然伽马曲线呈锯齿-齿状，双侧向曲呈中高值齿状。地震响应特征为层状、强振幅、连续反射，重力负异常、弱磁、低电阻率异常(图 5)。

采用地震相特征结合火山岩喷发模式定性预测、地震属性提取的层位选择是识别火山岩相带的关键，主要利用火山岩地层中内插的新层位提取层间沿层地震切片或地震属性，并根据不同的火山岩相带特性，在测井资料约束下利用神经网络对地震

波形进行分类的地震相，对火山岩岩相预测与重磁预测的岩相平面图基本一致(图 6a)，且能更细地区分火山岩岩相。根据前述，爆发相总体属于杂乱反射；火山沉积相属于火山岩到沉积岩的过渡相带，兼具火山岩和沉积岩的特征，在火山岩发育地带，它是连续性最好的区域，同时也是成层性最好、产状变化最缓慢的区域；溢流相带也具有一定的连续性，但包含不规则反射。根据以上多属性划分的边界、火山机构识别的结果，结合钻井资料可确定各个区带的火山口相、爆发相(近火山口相)、溢流相、火山沉积岩相带平面图(6b)。



a—达巴松凸起周缘石炭系火山机构预测；b—地层切片、高分辨率相干平面属性。

a—the predications of Carboniferous volcanic structure around the Dabasong uplift; b—strata slice and high resolution coherent plane attribute.

图 4 达巴松凸起周缘典型火山口识别图

Fig. 4 Images identifying typical craters around the Dabasong uplift

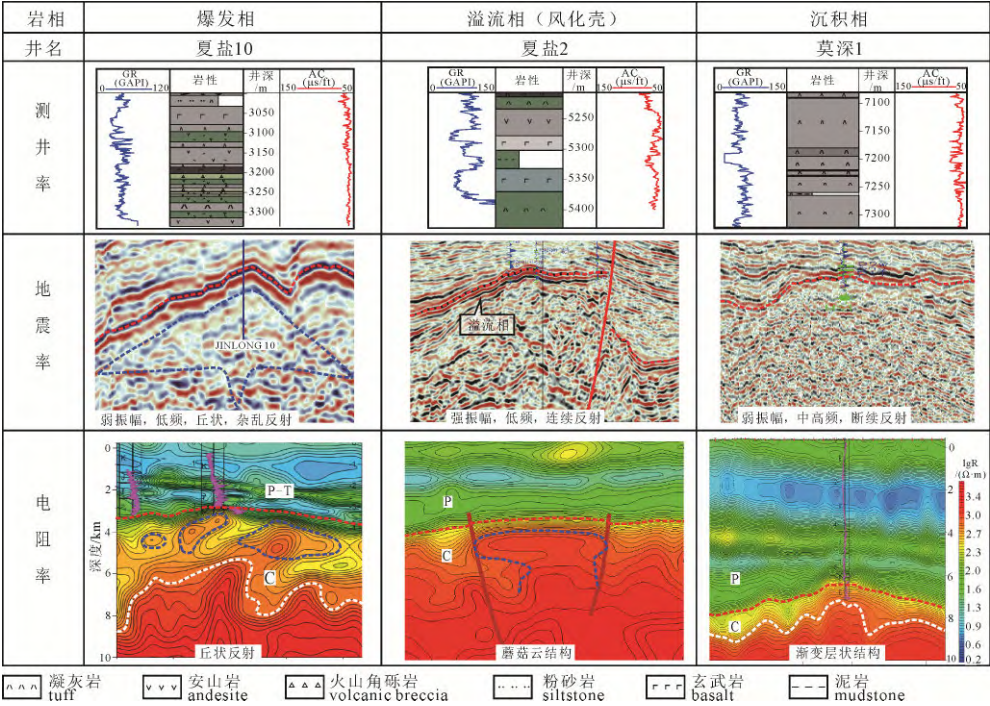
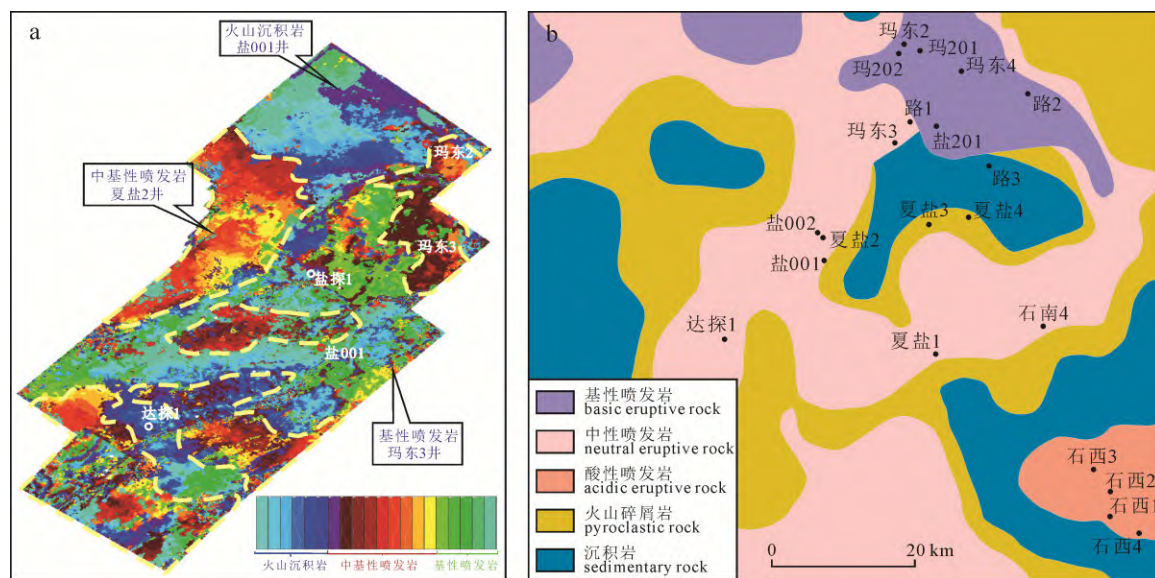


图5 达巴松地区火山岩相井、地震、电阻率特征图

Fig. 5 Characteristics of the well, seismic, and resistivity of volcanic rocks from Dabasong area



a—神经网络波形分类图; b—达巴松凸起石炭系火山岩相预测图。

a—classification map of neural network waveform; b—predictions of lithofacies for Carboniferous volcanic rocks in Dabasong uplift.

图6 达巴松凸起火山岩相带划分图

Fig. 6 The sketch map showing the lithofacies of volcanic rock from the Dabasong uplift

目前, 综合物化探技术在准噶尔盆地深层火山岩储层油气勘探中得到了广泛应用。盆地累计完成1:5万高精度重磁勘探面积超过70 000 km², 完成电法勘探超过10 000 km, 在盆地石炭系岩性识别、结构研究等方面取得了较好的勘探效果。

4 结论

本文在深入分析达巴松凸起地钻井、物性资料的基础上, 利用重磁电异常信息模式判别、地震相分析、地震属性解释、构造制图等综合物探评价技术, 对准噶尔盆地达巴松凸起深层火山岩进行识别和预测, 落实和优选了深层火山岩有利勘探目标:

(1)综合利用多种地球物理资料 and 解释技术, 在研究区深层石炭系解释并识别了火山岩14个, 火山岩总面积1562 km², 优选部署了风险探井达探1井, 在石炭系见良好天然气显示, 该井是准噶尔盆地首口在深层石炭系见天然气显示的探井, 有望开辟腹部深层大背斜、火山岩岩性油气藏勘探的新领域。

(2)准噶尔盆地叠合盆地地下组合广泛发育深层火山岩, 具有利用地球物理勘探和综合解释技术进行识别和预测的物理基础。

(3)高精度重磁勘探和处理手段, 可以较快圈定深层火山岩发育区, 锁定和缩小地震勘探靶区, 再通过井震统一的解释技术, 运用地震属性、相干体刻画等方法, 使得火山岩的解释在兼顾定性和定量结果的同时进一步深入解剖了火山岩内部的精细特征。

(4)重、磁、电、井、震的有机结合, 不仅在火山岩的识别精度上有了较大提高, 也证实了火山岩性、岩相与火山岩储层的重要关系。

(5)通过本次重磁电(井)震“五维一体”综合物探技术, 认清了火山岩相分布规律及特点, 进而预测了本区火山岩有利储层分布, 极大提高了火山岩气藏的描述精度, 取得了良好的勘探效果。在此基础上开展深层特殊地质体多方法综合物探技术总结, 进一步推动勘察成果的实际运用, 对准噶尔盆地油气勘探具有重要的指导意义。

Acknowledgements:

This study was Supported by PetroChina Company Limited (No. 2021DJ0206).

参考文献:

- 阿布力米提·依明, 查明, 杨帆, 尹鹤, 丁修建, 卞保力. 2019. 玛湖—达巴松地区石炭系火成岩储集层分布及其控制因素[J]. 新疆石油地质, 40(5): 564-569.
- 代春萌, 曾庆才, 李波, 徐淑娟, 李璇, 杨亚迪. 2019. 准噶尔盆地滴南凸起石炭系古火山机构地震特征及有利区预测[J]. 中国石油勘探, 24(6): 739-749.
- 冯玉辉, 边伟华, 顾国忠, 黄玉龙, 仇劲涛, 孙昂, 王璞琨. 2016. 中基性火山岩井约束地震岩相刻画方法[J]. 石油勘探与开发, 43(2): 228-236.
- 何文军, 费李莹, 阿布力米提·依明, 杨海波, 蓝文芳, 丁靖, 鲍海娟, 郭文建. 2019. 准噶尔盆地深层油气成藏条件与勘探潜力分析[J]. 地学前缘, 26(1): 189-201.
- 何展翔, 陈忠昌, 任文静, 庞恒昌, 田志权, 沈义斌. 2020. 时频电磁(TFEM)勘探技术: 数据采集系统[J]. 石油地球物理勘探, 55(5): 1131-1138.
- 黄芸, 梁舒艺, 贾春明, 谷新苹, 毛海波, 伏小鹏. 2020. 准噶尔盆地改造残留古火山机构判识与油气勘探实践[J]. 天然气工业, 40(3): 30-37.
- 李坤白, 吕海涛, 蒲仁海, 曹自成, 徐鹏晔. 2017. 塔里木盆地顺南地区火山口地震勘探方法及其与油气关系[J]. 地质科技情报, 36(5): 249-255.
- 李燕丽, 金凤鸣, 魏强, 王玉青, 刘雪军, 何展翔. 2016. 时频电磁法在冀中拗陷潜山及潜山内幕油气预测中的应用[J]. 石油地球物理勘探, 51(s1): 137-143.

- 李宗浩, 王春利, 李卉, 陈静, 王忠泉. 2021. 达巴松凸起石炭系火山岩油气勘探技术研究[J]. 西南石油大学学报(自然科学版): 1-10.
- 毛翔, 李江海, 张华添, 王洛. 2012. 准噶尔盆地及其周缘地区晚古生代火山机构分布与发育环境分析[J]. 岩石学报, 28(7): 2381-2391.
- 苏东旭, 王忠泉, 袁云峰, 韩宝. 2020. 准噶尔盆地玛湖凹陷南斜坡二叠系风城组风化壳型火山岩储层特征及控制因素[J]. 天然气地球科学, 31(2): 209-219.
- 王志刚, 何展翔, 覃荆城, 王子晗, 张林, 张永富. 2016. 时频电磁技术的新进展及应用效果[J]. 石油地球物理勘探, 51(s1): 144-151.
- 张磊, 何登发, 李淦, 冀冬生, 梁宇生, 郑孟林, 吴松涛, 周歌. 2019. 准噶尔盆地白家海凸起的石炭系地质结构与成因模型[J]. 地学前缘, 26(1): 149-164.
- 张楠, 鲁宝亮, 张超, 王万银. 2016. 利用航磁资料研究新疆西天山阿吾拉勒地区古火山口分布[J]. 地球物理学进展, 31(3): 1033-1039.
- 张楠, 吴燕冈, 周帅, 孙鹏飞. 2019. 基于地质体空间位置优化约束的航空重力梯度数据三维物性反演[J]. 地球物理学报, 62(4): 1515-1525.
- 张志让, 杨建勋, 李梅, 杨绍国. 2011. 频谱成像技术在特殊地质体储层预测中的应用研究[J]. 石油物探, 50(1): 69-75.
- 张镭哲, 李桐林, 刘财, 李福元, 邓馨卉, 石会彦. 2021. 基于数据空间和稀疏约束的三维重力和重力梯度数据联合反演[J]. 地球物理学报, 64(3): 1074-1089.
- 周惠, 田玉昆, 刘晓, 李娟, 马彦彦. 2019. 乌伦古坳陷深层石炭系火山岩低频地震识别技术应用[J]. 物探与化探, 43(6): 1217-1224.
- 周月, 官大维, 延海涛, 张小龙. 2021. 基于先验信息约束的重磁电联合三维交互反演技术实践——以彭山穹隆构造为例[J]. 物探与化探, 45(2): 308-315.

References:

- ABLIMITI Yi-ming, ZHA Ming, YANG Fan, YIN He, DING Xiu-jian, BIAN Bao-li. 2019. Carboniferous Igneous Reservoir Distribution and Its Controlling Factors in Mahu-Dabasong Area, Junggar Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 40(5): 564-569(in Chinese with English abstract).
- DAI Chun-meng, ZENG Qing-cai, LI Bo, XU Shu-juan, LI Xuan, YANG Ya-di. 2019. Seismic characteristics of Carboniferous ancient volcanic edifices and prediction of favorable zones in the Dinan bulge of the Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 24(6): 739-749(in Chinese with English abstract).
- FENG Yu-hui, BIAN Wei-hua, GU Guo-zhong, HUANG Yu-long, CHOU Jian-song, SU Ang, WANG Pu-jun. 2016. A drilling data-constrained seismic mapping for intermediate-mafic volcanic facies[J]. Petroleum Exploration and Development, 43(2): 228-236(in Chinese with English abstract).
- HE Wen-jun, FEI Li-ying, ABLIMITI Yiming, YANG Hai-bo, LAN Wen-fang, DING Jing, BAO Hai-juan, GUO Wen-jian. 2019. Accumulation conditions of deep hydrocarbon and exploration potential analysis in Junggar Basin, NW China[J]. Earth Science Frontiers, 26(1): 189-201(in Chinese with English abstract).
- HE Zhan-xiang, CHEN Zhong-chang, REN Wen-jing, PANG Heng-chang, TIAN Zhi-quan, SHEN Yi-bin. 2020. Time-frequency electromagnetic (TFEM) method: Data acquisition system and its application[J]. Oil Geophysical Prospecting, 55(5): 1131-1138(in Chinese with English abstract).
- HUANG Yun, LIANG Shu-yi, JIA Chun-ming, GU Xin-ping, MAO Hai-bo, FU Xiao-peng. 2020. Identification and oil and gas exploration practices of reworked residual paleovolcanic edifice in the Junggar Basin[J]. Natural Gas Industry, 40(3): 30-37(in Chinese with English abstract).
- LI Kun-bai, LÜ Hai-tao, PU Ren-hai, CAO Zi-cheng, XU Peng-ye. 2017. Seismic Exploration of Volcanic Craters in Shunnan Area, Tarim Basin and its Relationship with Oil and Gas[J]. Geological Science and Technology Information, 36(5): 249-255(in Chinese with English abstract).
- LI Yan-li, JIN Feng-ming, WEI Qiang, WANG Yu-qing, LIU Xue-jun, HE Zhang-xiang. 2016. Hydrocarbon prediction with TFEM in buried hills, Jizhong Depression[J]. Oil Geophysical Prospecting, 51(s1): 137-143(in Chinese with English abstract).
- LI Zong-hao, WANG Chun-li, LI Hui, CHEN Jing, WANG Zhong-quan. 2021. Technology Research of Igneous Reservoir Exploration in Dabasong Uplift[J]. Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition): 1-10(in Chinese with English abstract).
- MAO Xiang, LI Jiang-hai, ZHANG Hua-tian, WANG Luo. 2012. Study on the distribution and developmental environment of the Late Paleozoic volcanoes in Junggar Basin and its adjacent areas[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(7): 2381-2391(in Chinese with English abstract).
- SU Dong-xu, WANG Zhong-quan, YUAN Yun-feng, HANG Bao. 2020. Weathered volcanic reservoir characteristics and their controlling factors on Permian Fengcheng Formation in southern Mahu Depression, Junggar Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 31(2): 209-219(in Chinese with English abstract).
- WANG Zhi-gang, HE Zhan-xiang, QIN Jin-cheng, WANG Zi-han, ZHANG Lin, ZHANG Yong-fu. 2016. Advances of TFEM technique and its application[J]. Oil Geophysical Prospecting, 51(s1): 144-151(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Lei, HE Deng-fa, LI Di, JI Dong-sheng, LIANG Yu-sheng, ZHENG Meng-lin, WU Song-tao, ZHOU Ge. 2019. Geological structure and genesis model of the Baijiahai uplift in the Junggar Basin[J]. Earth Science Frontiers, 26(1): 149-164(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Nan, LU Bao-liang, ZHANH Chao, WANG Wan-yin. 2016. Distribution of ancient volcanic craters of Awulale region interpreted from aeromagnetic data in western Tianshan Mountain Xinjiang[J]. Progress in Geophysics, 31(3): 1033-1039 (in Chinese with English abstract).
- ZHANG Nan, WU Yan-gang, ZHOU Shuai, SUN Peng-fei. 2019. 3D inversion of airborne gravity gradient data for physical properties based on optimizing constraints of spatial position of the geologic body[J]. Chinese Journal of Geophysics, 62(4): 1515-1525(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Rong-zhe, LI Tong-lin, LIU Cai, LI Fu-yuan, DENG Xin-hui, SHI Hui-yan. 2021. Three-dimensional joint inversion of gravity and gravity gradient data based on data Space and sparse constraints[J]. Chinese Journal of Geophysics, 64(3): 1074-1089(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Zhi-rang, YANG Jian-xun, LI Mei, YANG Shao-guo. 2011. Application of frequency spectrum imaging technique for reservoir prediction of special geological bodies[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 50(1): 69-75(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Hui, TIAN Yu-kun, LIU Xiao, LI Juan, MA Yan-yan. 2019. The application of low frequency seismic identification technology to deep Carboniferous volcanic rocks in Wulungu depression[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 43(6): 1217-1224(in Chinese with English abstract).
- ZHOU Yue, GUAN Da-wei, YAN Hai-tao, ZHANG Xiao-long. 2021. 3D gravity magnetic and electrical inversion modeling based on prior information: A case study of the dome structure in Pengshan area, Jiangxi Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 45(2): 308-315(in Chinese with English abstract).