doi: 10.11720/wtyht.2026.1080
陈海宏, 石卓, 杨志成, 等. 时频电磁法在牛驼镇凸起油气资源勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2026, 50(2): 216-224. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1080
Chen H H, Shi Z, Yang Z C, et al. Application of the time-frequency electromagnetic method in hydrocarbon exploration in the Niutuozhen uplift[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(2): 216-224. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1080

时频电磁法在牛驼镇凸起油气资源勘查中的应用

陈海宏[1,2], 石卓[1], 杨志成[1], 王兴会[1]
(1. 安徽省勘查技术院 安徽省地质矿产勘查局能源勘查中心, 安徽 合肥 230031; 2. 安徽省电法勘探重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘 要: 时频电磁法(the time-frequency electromagnetic, TFEM)是新兴的电磁勘查技术方法, 21 世纪初兴起, 从油气勘查领域引进和发展, 融合了频率域和时间域电磁技术方法的优点, 能够在复杂地质条件下提供更高分辨率和更精确的地下结构成像, 在能源勘查中发挥了重要作用。本文介绍了 TFEM 在牛驼镇凸起油气资源勘查中的应用效果, 总结分析了牛驼镇凸起油气藏上层的电磁响应特征为低阻、高极化; 凸起油气藏内部的电磁响应特征为高阻、高极化。根据 TFEM 异常响应规律, 在牛驼镇凸起圈定了 5 个含油气有利区, 与已知油气钻井基本吻合, 为该地区油气资源的开发利用提供了坚实的基础。

关键词: 时频电磁法; 牛驼镇凸起; 油气资源勘查
中图分类号: P631;P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)02-0216-09

0 引言

深部油气勘查最常用的物探方法是地震勘探, 然而在一些地震激发条件不理想或者地下构造复杂的区域, 地震反射信号较弱, 成像效果不理想, 无法达到油气预测的目的。近年来, 时频电磁法作为一种直接预测油气的方法, 在油气勘探领域得到了广泛应用[1-3]。该方法能获得频率域和时间域信号, 同时获得深部流体的有效激发极化信息[4-7], 达到油气预测的目的。赵一丹等[8]在国内某盆地利用时频电磁法结合地震勘探方法进行油气预测, 取得了较好的勘探效果。于波等[9]利用时频电磁法在黄土塬覆盖区进行油藏预测, 采用双源激发、多线接收的采集方式, 获得了较好的解释成果, 经钻孔验证了时频电磁法的有效性。李燕丽等[10]应用时频电磁法对冀中坳陷潜山及潜山内幕进行油气预测, 总结了潜山含油气的时频响应特征。综上可以看出, 时频电磁法在国内多个油气田勘探中都取得较好效果。

本次研究区位于冀中坳陷北部的牛驼镇凸起, 地质资料显示, 该区烃源岩厚度大, 有机质丰度和演化程度高, 油气源充足, 油源条件十分优越。但截止到目前, 牛驼镇凸起潜山内幕油藏还没有被找到。为了对牛驼镇凸起潜山及潜山内幕油气藏进行预测, 本次使用时频电磁法在该区域进行油气资源勘查, 布置了 10 条时频电磁法测线, 其中 05 测线经过已知井雄 11、雄 102、淀 6-3 井、淀 6 井和淀 6-2 井, 05 测线时频电磁法反演结果揭示了牛驼镇潜山带推测油气藏时频电磁异常特征, 即潜山顶部为高极化率和低电阻率的特征, 潜山内幕为高极化率和高电阻率的特征。基于 05 测线过已知井电阻率和极化率解释分析, 本文在其他测线上预测了 3 个潜山含油气有利区, 为后续打钻提供依据。

1 时频电磁技术

时频电磁法(TFEM)勘探技术最早是结合时间

收稿日期: 2025-03-18; **修回日期**: 2025-04-22
基金项目: 地球深部探测与矿产资源勘查国家科技重大专项"航空电磁/磁及伽马能谱勘查系统集成与应用"(2024ZD1002805); 安徽省重点研究与开发计划项目(2022I07020010)
第一作者: 陈海宏(1985-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要从事电磁法勘查及技术研究工作。Email: 363136320@qq.com

域瞬变电磁法和频率域音频大地电磁法等方法而提出[11-13], 由我国东方地球物理公司引进和改善形成电磁勘探方法。时频电磁法是一种人工源电磁勘查技术方法, 野外工作方式与可控源音频大地电磁法(CSAMT)类似, 如图 1 所示, 在工区布置两个供电电极 A 和 B, 人工向地下供入较大电流, 进行大功率的电脉冲方波激发, 在一定距离的远处进行数据采集[14]。其原理是当电磁场穿过地下介质时, 会激发出感应电流, 产生随时间和频率变化而变化的电磁响应信号[15]。该方法可实现同时采集频率域与时间域信号, 通过水平电场、垂直磁场、电阻率、极化率等多种参数的联合, 实现近区/远区深部结构的高精度探测, 获得勘探目标的电阻率和极化率异常, 具有高性噪比、高分辨率、高生产效率的优势[16]。

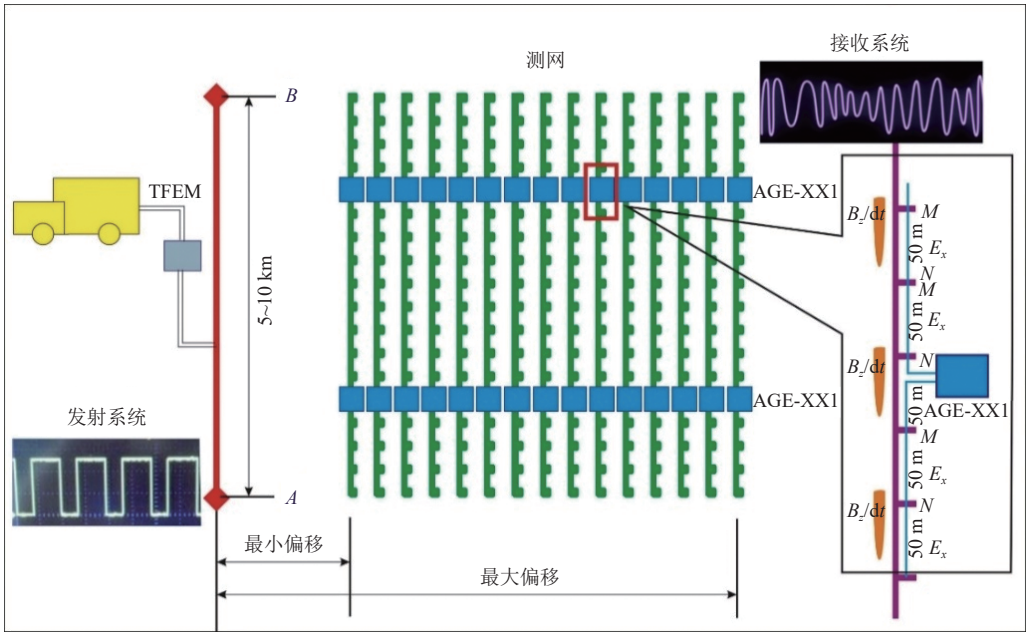


图 1　时频电磁法工作示意

Fig. 1　Schematic diagram of time-frequency electromagnetic method operation

2　工区概况及地球物理特征

牛驼镇凸起潜山带时频电磁勘探区块行政隶属雄安新区管辖, 地理坐标为 38°54′N~39°02′N, 116°00′E~116°11′E。工区南北长约 33 km, 东西长约 44 km。

2.1　构造和地层特征

本次时频电磁法勘探研究区位于二级构造单元牛驼镇凸起上, 该凸起位于冀中坳陷北部, 霸县凹陷和廊固凹陷之间, 凸起面积约 650 km^2。

牛驼镇凸起潜山顶面及内幕的形态为一个弯曲的腰形带, 在凸起上发育残丘型潜山, 形态为长轴背斜, 其走向与牛驼镇凸起方向一致[17]。南部残丘走向多为 NNE 向, 向东北变为近 EW 向。凸起潜山顶面总体上为向 NE 倾斜, 潜山地层也向 NE 倾, 与东南侧牛东大断层组成单面山形态。牛东大断层规模较大, 长达 72 km。潜山顶面落差较大, 南部达 2 200 m, 北部落差约 900～1 200 m。

牛驼镇凸起被第四系和新近系明化镇组(个别井揭示为馆陶组)覆盖, 其厚度在 528～1 077 m 之间, 并以不整合面与其下伏古生界、中元古界、新元古界相接触。从钻井揭示的地层看, 从北部牛北斜坡揭示的石炭—二叠系到南端雄 11 井钻遇到的长城系高于庄组, 地层表现出南老北新的特点。

2.2　油气地质特征

由于牛驼镇凸起北坡缺少大断层, 古近系烃源岩不能和凸起内的高于庄组及以上潜山地层直接接触, 廊固凹陷生成的油气很难直接进入潜山地层, 而霸县凹陷有较好的断面供油条件, 凹陷中生成的油气可以通过断层、断面和不整合面等多种输导层向潜山供油[17]。

雾迷山组、长城系高于庄组、长城系常州沟组均可以作为储集层。本区各层段地层均发育厚度较大的泥岩, 且单层泥岩厚度大, 封闭性能好, 对下伏储集层均有良好的封盖作用。各层段内部的泥岩均可作下伏储集层的盖层。

根据储层与盖(隔)层之间的关系, 结合地震、测井、钻井、试油及野外露头观察等资料, 认为牛驼镇凸起南段主要发育了 1 套潜山储盖组合和 3 套潜山

内幕储盖组合。根据潜山的结构特征、圈闭的发育部位和储盖组合关系,将牛驼镇凸起南段潜山圈闭划分为潜山顶型和潜山内幕型两大类。

2.3 工区电性特征

目前,根据收集到的具有代表性的 7 口钻井的电测井及地层划分的相关资料对本区地层电性进行分析。这 7 口钻井分别是高深 1 井、雄古 1 井、霸 25 井、霸 8 井、霸 13 井、霸 28 井、雄 11 井。高深 1 井除奥陶、寒武系缺失外,其余层位比较齐全。雄古 1 井是唯一打到太古宇地层的测井。霸 25 井、霸 8 井、霸 13 井位于牛驼镇凸起的北部,霸 28 井、雄 11 井位于牛驼镇凸起的南部。根据各井不同井段上的电阻率变化特征,分段统计了 7 口钻井不同井段的电阻率算术平均值,各井位对应地层的电阻率算术平均值如表 1 所示。

表 1　牛驼镇凸起地区已知井测井电阻率统计

Table 1　Statistics of well logging resistivity in the known wells of the uplift area in Niutuozhen

层位	电阻率值/(Ω·m)								深度/m
	高深1	雄古1	霸25	霸8	霸13	霸28	雄11	平均值	
更新统(Qp)	11.93	—	27.2	19.97	23.94	—	—	20.76	0~100
明化镇组(N*m*)	5.83	—	4.18	5.51	13.87	3.92	4.1	6.235	100~1 000
馆陶组(Ng)	6.08	5.76	—	5.53	—	—	—	5.79	
东营组(E*d*)	3.95	4.4	—	—	4.6	—	—	4.32	700~1 000
沙河街组一段(Es_1)	4.75	4.43	—	—	—	—	—	4.59	1 000~1 900
沙河街组二段(Es_2)	6.35	4.56	—	—	—	—	—	5.455	
沙河街组三段(Es_3)									
沙河街组四段(Es_4)									
孔店组(E*k*)	8.62	—	—	—	—	—	—	8.62	
奥陶系(O)	—	—	—	—	254.16	—		254.16	1 900~2 800
石灰岩组(C*mlf*)	—	—	—	—	173.88	—		173.88	
雾迷山组(Jx*w*)	203.07	—	1 352.2	1 234	—	—	—	929.76	900~1 800
杨庄组(Jx*y*)	243.22	—	—	1 246.7	—	—	—	744.96	
高于庄组(Ch*g*)	191.44	—	—	1 007.14	—	—	—	599.29	2 600~2 700
大红峪组(Ch*d*)	247.96	—	—	—	—	—	—	247.96	
团子山组(Ch*t*)	196.8	—	—	—	—	—	—	196.8	
串岭沟组(Ch*ch*)	115.02	—	—	—	—	—	—	115.02	
常州沟组(Ch*c*)	112.46	—	—	—	—	—	—	112.46	
太古宇(Ar)	—	98.28	—	—	—	—	—	98.28	3 200~5 000

注:“—”代表无电阻率资料

3　数据的采集与处理

3.1 数据采集

本次牛驼镇凸起潜山带研究区时频电磁勘探布设 10 条测线,每条测线长度 155.8 km,测点 794 个,图 2 是本次研究区时频电磁法测线及井位分布,其中测线 05 布设时经过已知钻井位雄 11、雄 102、淀 6-3 井、淀 6 井和淀 6-2 井。*AB* 距 6 000~8 406 m,*MN* 极距 100 m,供电电流 50~70 A,频率范围 0.025~512 Hz,时间为 40 s,最佳采集区域为发射源 120°控制范围内,收发距 601.4~8 021.2 m,可以有效压制工作区内的人文干扰,取得了质量较好的原始数据。

3.2 数据处理

本次时频电磁资料处理,数据网格采用克吕格法,网度为 50 m×20 m,作图比例尺 1∶5 万。时频电磁法原始数据采集之后,对每个场分量的每个频率的信号进行叠加,提高信号品质。对每个频率记录的信号进行频谱分析,得到每个频率信号的基频及其谐波[6]。汇总所有信号的频谱,得到从高频到低频信号的频谱,用于研究各个场分量的整个频谱的规律,计算全区视电阻率和相位曲线。

在研究地层电性时,引入极化效应,即对介质的电阻率$\rho(\omega)$采用更精确的形式:

$$\rho(\omega)=\rho_0\left(1-\frac{\eta}{1+\sqrt{-\mathrm{i}\omega t}}\right), \qquad (1)$$

式中:ρ_0为直流视电阻率;η 为极化率;ω为角频率,rad/s;t 为时间。

利用双频或三频相位来提取激发极化相位异常,激发极化双频相位参数:

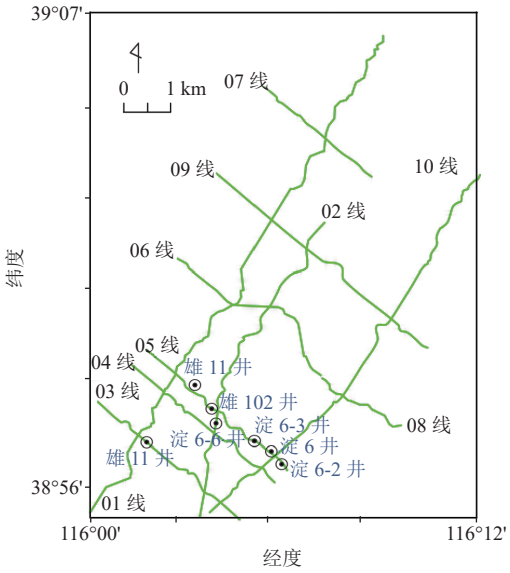


图 2　研究区测线及井位分布

Fig. 2　Distribution of survey lines and well locations in the study area

$$\Delta\varphi_m = \frac{\omega_2\varphi(\omega_1)-\omega_1\varphi(\omega_2)}{\omega_2-\omega_1}, \qquad (2)$$

式中: $\varphi(\omega_1)$和 $\varphi(\omega_2)$为当频率为 ω_1 和 ω_2 时, 场源电场的绝对相位。对于多个频率可以求取一系列激发极化相位。

使用程序对时频电磁法的数据进行处理, 流程如图 3 所示: ①测线文件建立: 将原始数据按照程序需求的格式编辑好后输入; ②点位偏差校正: 将明显出现偏差的数据点进行校正; ③曲线坏频点、坏频段处理: 对于明显出现偏差的频点或频段进行剔除或校正; ④测线坏点处理: 主要进行静态校正和近场效应校正, 剔除畸变严重的点, 不参与反演计算; ⑤测线断面反演: 主要包括电阻率反演和极化率反演; ⑥成果输出: 反演完成后, 提取电阻率和极化率反演数据以及输出电阻率图和极化率图。

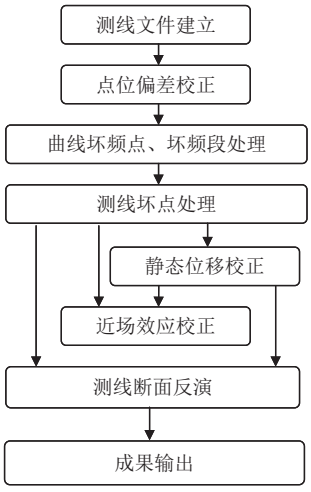


图 3　时频电磁数据处理流程

Fig. 3　Time frequency electromagnetic data processing flow

4　反演结果综合解释

4.1　已知油（气）藏的时频电磁异常特征

根据研究区 10 条时频电磁法反演的电阻率和已知测井电阻率特征划分了 4 个电性层, 结合已知地质构造资料推断了 7 个断层。图 4 是牛驼镇基底埋深及断裂位置, 可以看出, 工区基底埋深以 F_7 为界, 断裂西北基底较浅, 为牛驼镇凸起, F_7 断裂东南部基底埋深较深, 为霸县凹陷。

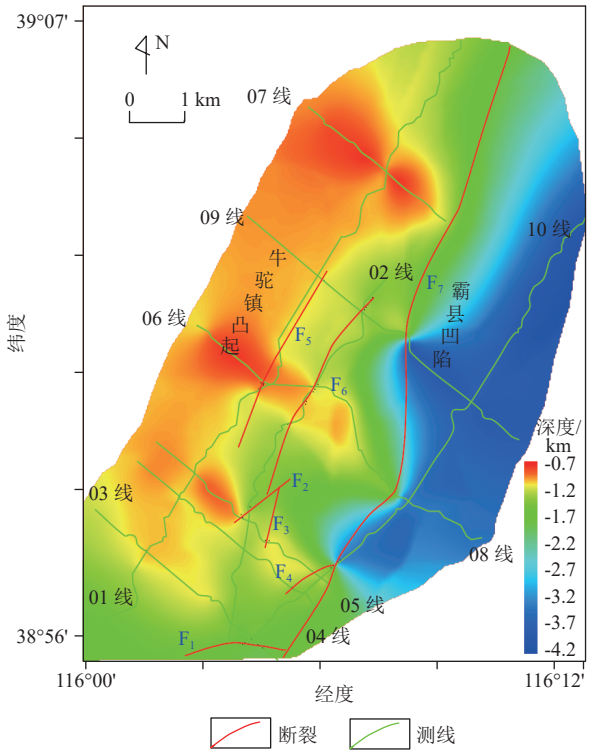


图 4　牛驼镇研究区基地埋深及断裂位置

Fig. 4　Burial depth and fault location of Niutuozhen research area base

图 5 是时频电磁测线 05 线反演出的电阻率和极化率结果, 总共划分为 4 个电性层: 第一电性层深度自地表至−800～−1 500 m, 为相对低阻层, 电阻率值相对较低, 且分布较均匀, 反演电阻率在 4 Ω·m 以下, 推断为第四系(Q)到古近系(E*d*)地层, 岩性以砂质黏土、石英砂岩、粉砂质泥岩为主。该层厚度在 800～1 500 m 左右, 总体地层连续, 变化不大。

第二电性层深度自上覆地层底部一直延伸至−1 800～−2 000 m, 为相对高阻层, 反演电阻率值在 4～20 Ω·m, 推断为雾谜山组(Jx*w*)地层的反映, 岩性以白云岩和硅质白云岩为主。受断裂影响, 部分地层破碎含水, 电阻率降低。

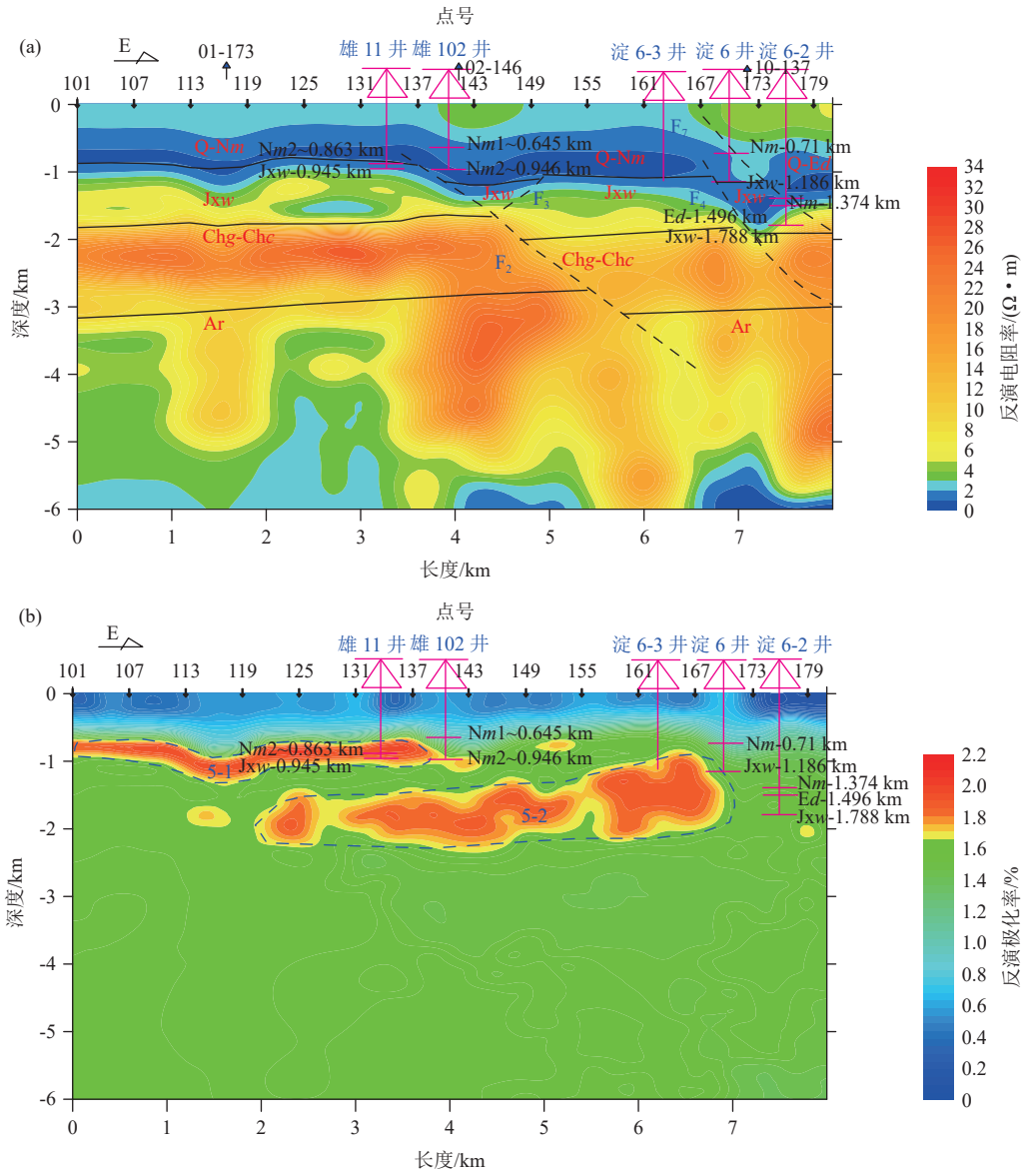


图 5　测线 05 的综合剖面

Fig. 5　Comprehensive section of measurement line 05

第三电性层深度自上覆地层底部一直延伸至−3 000～−3 100 m, 为高阻层, 电阻率值在 20 Ω·m, 推断为长城系高于庄组 (Chg) 和常州沟组(Chc)地层, 岩性以砂砾岩和石英岩状砂岩为主。

第四电性层深度自上覆地层底部一直延伸至剖面底部, 为相对高阻层, 反演电阻率值在 4～20 Ω·m 之间, 推断为太古宇(Ar)地层的反映, 岩性中上部以浅灰色、深灰色片麻岩为主, 下部为灰黑色斜长角闪岩, 底部为浅灰、灰色片麻岩。

05 线的极化率剖面图上有 2 个高极化异常区 5-1 和 5-2, 表 2 是已知测井对应的目标层位的极化率和电阻率, 表中列出了产油井和非油气井, 产油气井的出油层位位于雾谜山组顶部。5-1 异常经过已知油气藏的雄 11 井, 该井有油气流, 异常电阻率在

表 2　牛驼镇凸起工区钻井对应反演电阻率、极化率统计

Table 2　Statistics of inversion resistivity and polarizability corresponding to drilling in Niutuozhen uplift work area

井号	层位	极化率/%	电阻率/(Ω·m)	测线位置	产油情况
雄11井	Jxw	2.0	1~2	134/05线(投影)	潜山残丘获得低产工业油流(865.97~876.68 m)
淀6-3井	Jxw	1.9~20	1~2	163/05线	低产油流井
淀6井	Jxw	1.9~20	1~2	170-171/05线	低产油流井
雄102井	Jxw	1.6~1.7	1~2	140-141/05线	无油气
淀6-2井	Jxw	1.6~1.7	1~2	146/05线	无油气

1～2 Ω·m 之间, 总体表现为低阻特征。5-2 异常经过已知油气藏, 异常范围内的淀 6-3 井、淀 6 井均有油气流, 电阻率在 3～20 Ω·m 之间, 表现为高阻特征。通过对比分析, 产油井的极化率在 1.8% 以上, 而无油气井的极化率在 1.7% 以下。

4.2　有利油气区预测

时频电磁法解释主要根据电阻率和极化率对油气进行预测, 根据过井 05 测线, 极化率异常幅值较高(1.8%～2.1%), 最大值在 2.0% 及以上, 异常形态完整且规模较大, 异常位于比较有利的构造位置, 该类型异常确定为有利油气分布区。本工区设计的 10 条测线, 除了过井 05 测线的两个有利油气分布区 5-1、5-2 外, 在 02 测线、03 测线和 09 测线均分别预测了一个有利油气分布区。

图 6 为 02 测线电阻率和极化率解释结果。在 132～159 号点间, 埋深 1 600 m 以下有高极化率异常存在, 其极化率异常较强(极化率最大值为 2.0%)、范围较大, 异常向下延伸到 2 600 m 左右, 其中心埋深在 2 100 m 左右, 异常呈层状分布的特征。2-1 异常与 5-1 异常交叉, 为已知油气藏下部异常, 异常位于长城系地层中。从 02 线的电阻率剖面可以看出, 异常电阻率在 10～22 Ω·m 之间, 总体表现为高阻特征。长城系地层孔隙和裂缝发育, 地层中杨庄组和常州沟组泥质含量较高, 封闭性较好, 可以作为较好的盖层。异常范围上的淀 6-6 井在明化镇组(N*m*)产工业油气流。该异常位于构造高点上, 处于有利的油气圈闭区域, 据此判断为有利油气分布区。

图 7 为 03 测线电阻率和极化率解释结果, 在 105～134 号点间埋深 1 200 m 以下有高极化率异常存在, 其极化率异常较强(极化率最大值为 2.1%)、范围较大, 异常向下延伸到 2 200 m 左右, 其中心埋深在 1 700 m 左右, 异常呈层状分布的特征。从 03 线的电阻率剖面可以看出, 异常电阻率在 3~20 Ω·m 之间, 总体表现为高阻特征。异常上部位于雾谜山组, 下部位于长城系地层中。雾谜山地层裂缝和孔洞发育, 可以提供良好的储存空间, 上伏地层明化镇组泥岩地层可以作为盖层, 不整合面和断裂作为油气运移的通道, 异常圈闭完整、范围较大且异常位于构造高点上, 处于有利的异常分布区。

图 8 是 09 测线电阻率和极化率解释结果。在

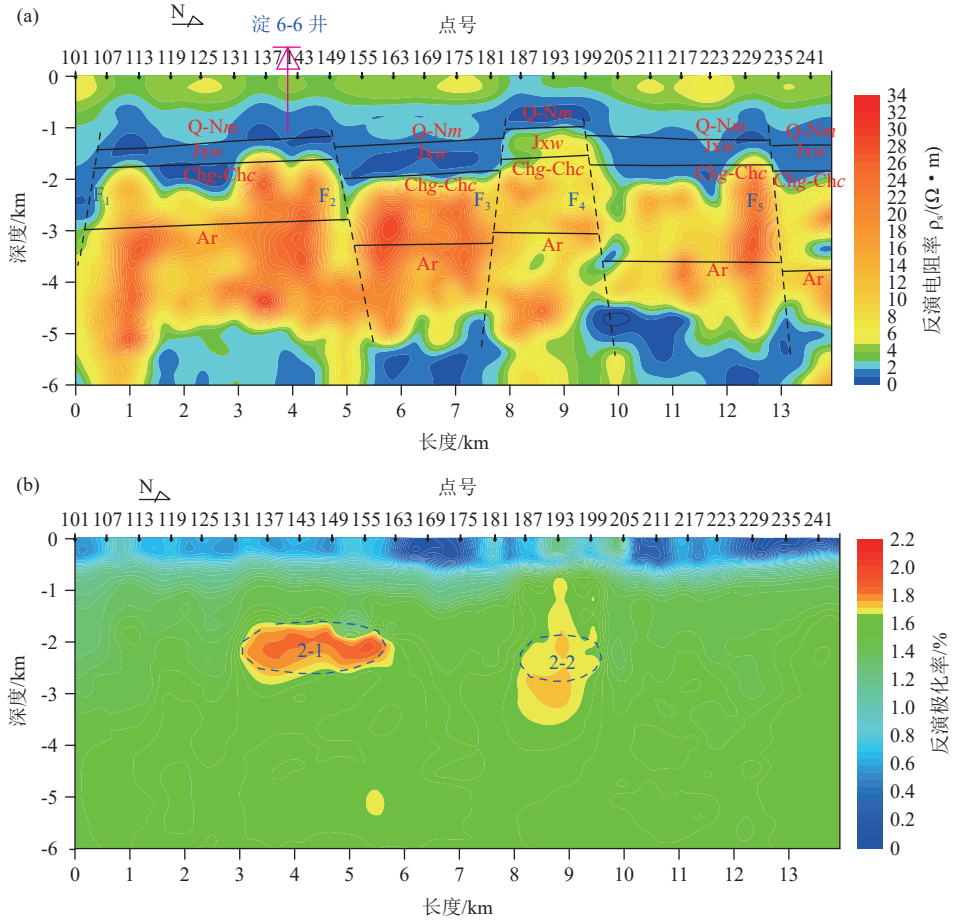


图 6　测线 02 的综合剖面

Fig. 6　Comprehensive section of measurement line 02

101～150 号点间埋深 600 m 以下有高极化率异常存在，其极化率异常较强（极化率最大值为 2.1%）、范围较大，呈层状分布，异常向下延伸到 1 200 m 左右，其中心埋深在 900 m 左右。从 09 线的电阻率剖面图上看，异常电阻率在 1～6 Ω·m 之间，总体表现为低阻特征。异常位于雾谜山组，雾谜山地层裂缝和

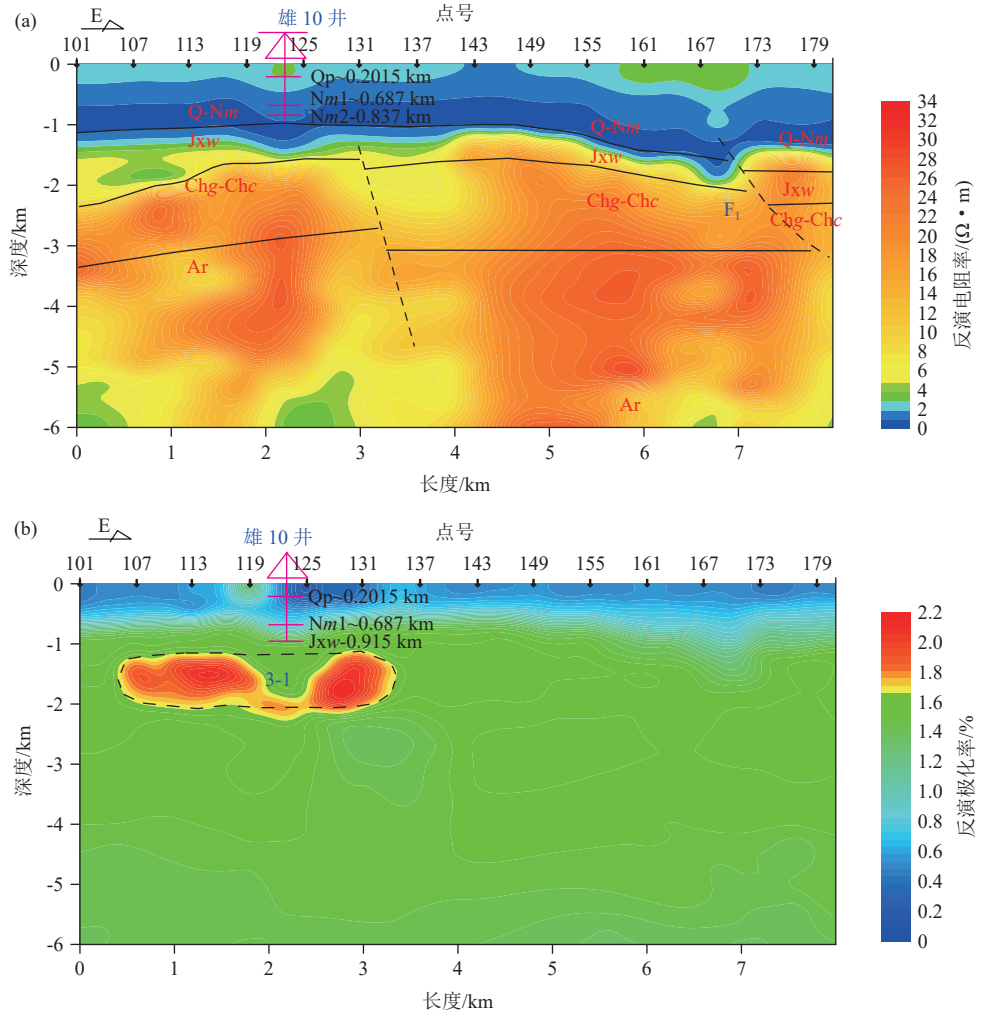


图 7　测线 03 的综合剖面

Fig. 7　Comprehensive section of measurement line 03

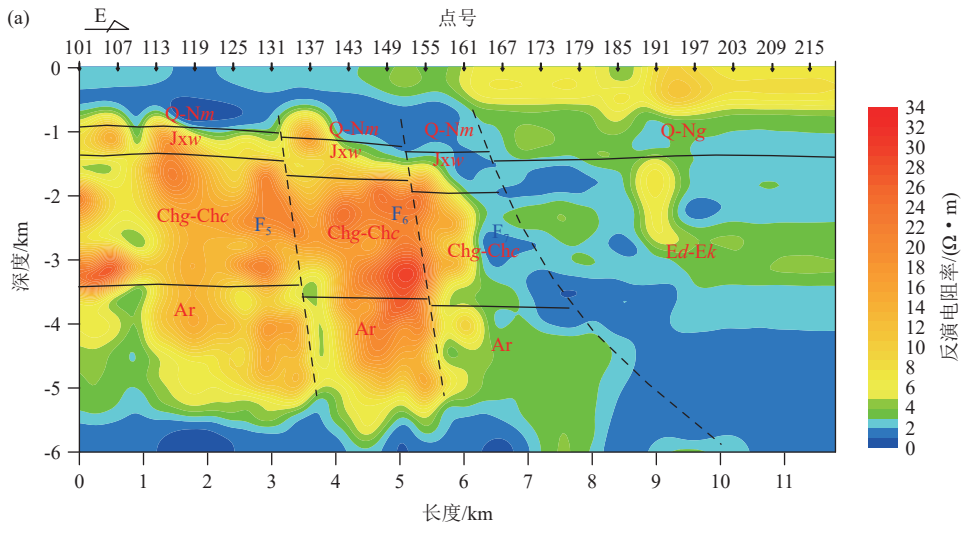


图 8-1　测线 09 的综合剖面

Fig. 8-1　Comprehensive section of measurement line 09

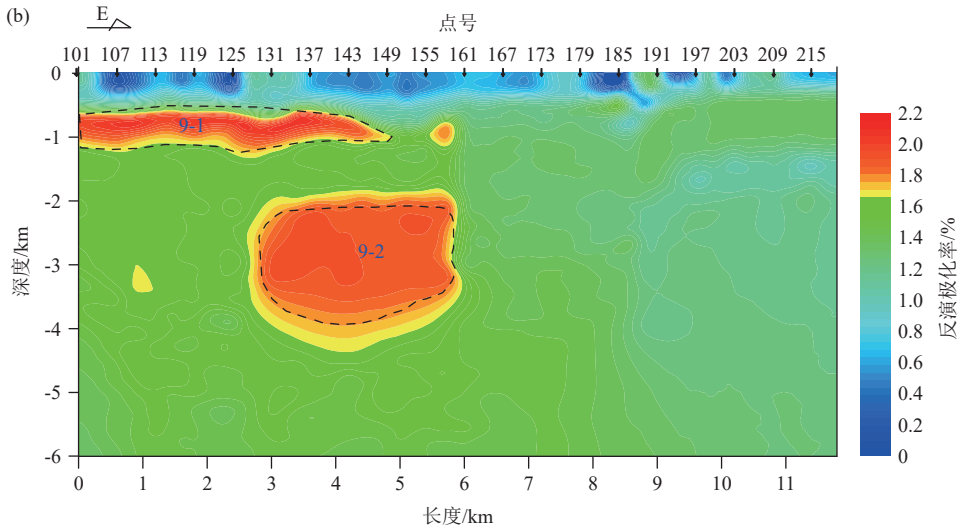


图 8-2　测线 09 的综合剖面

Fig. 8-2　Comprehensive section of measurement line 09

孔洞发育, 提供了良好的储存空间, 上伏地层明化镇组泥岩地层可以作为盖层, 不整合面和断裂作为油气运移的通道, 异常圈闭完整、范围较大, 处于有利的异常分布区。

5　结论

通过对牛驼镇凸起潜山及潜山内幕进行时频电磁法勘探研究分析, 可以得出:

1)时频电磁法推测油气藏的异常总体特征为: 牛驼山凸起潜山顶部油气藏表现为高极化率和低电阻的特征, 潜山内部油气藏主要表现为高极化率和高电阻的特征。

2)时频电磁法反演的电阻率对地层反映清楚, 可以准确圈定潜山顶面, 时频电磁法反演极化率异常明显, 可以圈定油气有利区。

3)时频电磁法的探测深度主要与激发的周期有关, 激发的周期越长探测深度越大, 但随着勘探深度的增加, 其纵向分辨率也不断降低。

参考文献(References):

[1] 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. Research and application of time-frequency electromagnetic method for full parameter inversion[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2018.

[2] 朱永山, 雷栋, 李燕丽, 等. 琼北干热岩勘探中大功率时频电磁法的应用 [J]. 化工矿产地质, 20, 45(3): 250-257.
Zhu Y S, Lei D, Li Y L, et al. Application of high-power time-frequency electromagnetic method in exploration of dry-hot rocks in northern Hainan [J]. Chemical Mineral Geology, 20, 45(3): 250-257.

[3] 宋涛, 刁谦. 时频电磁法在地热资源勘查中的应用 [J]. 内蒙古煤炭经, 2022(16): 190−192.
Song T, Diao Q. Application of time-frequency electromagnetic method in geothermal resource exploration[J]. Inner Mongolia Coal Economy, 2022(16): 190−192.

[4] 王永涛, 杨战军, 王学慧, 等. 时频电磁多属性图像融合预测油气技术及应用 [J]. 物探与化探, 2020, 44(5): 1221−1225.
Wang Y T, Yang Z J, Wang X H, et al. TFEM multi-attribute image fusion hydrocarbon prediction technique and its application[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 1221−1225.

[5] 周佳和. 时频电磁法在准噶尔盆地沙帐断褶带的应用研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2020.
Zhou J H. Study on application of time-frequency electromagnetic method in Shazhang fault fold belt in Junggar basin[D]. Changchun: Jilin University, 2020.

[6] 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, 1202−1203.
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, 1202−1203.

[7] 王珺璐, 陈辉, 罗先中, 等. 大功率—超大功率电 (磁) 探测技术进展与展望 [J]. 物探与化探, 2025, 49(4): 755−767.
Wang J L, Chen H, Luo X Z, et al. Progress and prospects of high-power ultra high power electric (magnetic) detection technology[J]. Geophysical and Chemical Exploration, 2025, 49(4): 755−767.

[8] 赵一丹, 何展翔, 郑求根, 等. 时频电磁法含油气有利区预测在 T 盆地的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(S1): 228−232, 10.
Zhao Y D, He Z X, Zheng Q G, et al. Favorable oil and gas target prediction with time-fre-quency electromagnetic method in T Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(S1): 228−232, 10.

[9] 于波, 王学刚, 李明瑞, 等. 时频电磁技术在黄土塬覆盖区河道砂油藏分布预测中的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2024, 59(3): 620−628.
Yu B, Wang X G, Li M R, et al. Application of time-frequency electromagnetic(TFEM) technology in prediction of channel sand reservoir distribution in Loess Plateau area[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2024, 59(3): 620−628.

[10] 李燕丽, 金凤鸣, 魏强, 等. 时频电磁法在冀中坳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, 2016, 51(S1): 137−143, 10−11.
Li Y L, Jin F M, Wei Q, et al. Hydrocarbon prediction with TFEM in buried hills, Jizhong depression[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(S1): 137−143, 10−11.

[11] 何展翔, 杨国世, 陈思琪, 等. 时频电磁(TFEM)技术: 数据采集参数设计 [J]. 石油地球物理勘探, 2019, 54(4): 908−914, 727.
He Z X, Yang G S, Chen S Q, et al. Time-frequency electromagnetic(TFEM) method: Data acquisition design[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(4): 908−914, 727.

[12] 程正璞, 雷鸣, 李成等. 天津东丽湖深部岩溶热储时频电磁法探测及有利区预测 [J]. 华北地质, 2023, 46(2): 1−8.
Cheng Z P, Lei M, Li S, et al. Time frequency electromagnetic detection and prediction of favorable areas for deep karst thermal reservoirs in Dongli Lake, Tianjin[J]. North China Geology, 2023, 46(2): 1−8.

[13] 何展翔, 陈忠昌, 任文静, 等. 时频电磁(TFEM)勘探技术: 数据采集系统 [J]. 石油地球物理勘探, 2020, 55(5): 1131−1138, 937.
He Z X, Chen Z C, Ren W J, et al. Time-frequency electromagnetic(TFEM) method: Data acquisition system and its application [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(5): 1131−1138, 937.

[14] 杨志成, 陈海宏, 周玲玲, 等. 时频电磁法在金牛湖地区深部地热资源勘查中的应用 [J]. 工程地球物理学报, 2024, 21(1): 81−91.
Yang Z C, Chen H H, Zhou L L, et al. Application of time-frequency electromagnetic method in exploration of deep geothermal resources in Jinniu Lake area[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2024, 21(1): 81−91.

[15] 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, 11.
Wang Z G, He Z X, Qin J C, et al. New progress and application effect of time-frequency electromagnetic technology[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(S1): 144−151, 11.

[16] 魏巍, 高文龙, 王腾宇, 等. 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 [J]. 物探化探计算技术, 2024, 46(3): 332−340.
Wei W, Gao W L, Wang T Y, et al. Application of time-frequency electromagnetic method in the exploration of deep structures in the Bashibulak-Upor tectonic belt[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 46(3): 332−340.

[17] 周从安, 李先平, 辛玮江, 等. 冀中坳陷牛驼镇凸起潜山内幕勘探成藏条件研究 [J]. 中国石油勘探, 2010, 15(2): 29−32, 84−85.
Zhou C A, Li X P, Xin W J, et al. Research on hydrocarbon accumulating conditions of internal buried hills exploration in Niutuozhen uplift in Jizhong Sag[J]. China Petroleum Exploration, 2010, 15(2): 29−32, 84−85.

Application of the time-frequency electromagnetic method in hydrocarbon exploration in the Niutuozhen uplift

CHEN Hai-Hong[1,2], SHI Zhuo[1], YANG Zhi-Cheng[1], WANG Xing-Hui[1]

(1. *Geological Exploration Technology Institute of Anhui Province, Energy Exploration Center of Bureau of Geology and Mineral Exploration of Anhui Province, Hefei* 230031, *China*; 2. *Anhui Provincial Key Laboratory of Electrical Prospecting, Hefei* 230031, *China*)

Abstract: The time-frequency electromagnetic (TFEM) method, a new electromagnetic exploration technique, emerged at the beginning of this century, followed by its introduction and development in the hydrocarbon exploration field. It combines the advantages of both frequency-domain and time-domain electromagnetic techniques, offering a higher resolution and more accurate imaging of underground structures under complex geological conditions. It plays an important role in energy resources exploration. This paper presented the application of the TFEM method in the hydrocarbon exploration in the Niutuozhen uplift. The results indicate that the hydrocarbon reservoirs in this uplift exhibited low-resistance and high-polarization electromagnetic response from the upper layers. Conversely, they showed the high-resistance and high-polarization electromagnetic response from the internal. Based on the TFEM abnormal response patterns, five play fairways were delineated in the Niutuozhen uplift, which were basically consistent with known drilling data. This study provides a solid foundation for the hydrocarbon development and utilization in this area.

Key words: time-frequency electromagnetic (TFEM) method; Niutuozhen uplift; hydrocarbon exploration

（本文编辑：王萌）