doi: 10.11720/wtyht.2026.1084
文欢, 丁立明, 王震, 等. 时频电磁法在塔河油田缝洞型油气藏剩余油检测中的应用[J]. 物探与化探, 2026, 50(4): 655-664. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1084
Wen H, Ding L M, Wang Z, et al. The application of time-frequency electromagnetic method in the detection of remaining oil in fractured-vuggy oil and gas reservoirs in the Tahe area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(4): 655-664. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1084

时频电磁法在塔河油田缝洞型油气藏剩余油检测中的应用

文欢[1,2], 丁立明[1,2], 王震[1,2], 李杰[1,2], 李忠华[3]
(1. 中国石化碳酸盐岩缝洞型油藏提高采收率重点实验室, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830011; 2. 中国石化西北油田分公司勘探开发研究院, 新疆维吾尔自治区 乌鲁木齐 830011; 3. 江苏华东八一四地球物理勘查有限公司(江苏省有色金属华东地质勘查局八一四队), 江苏 南京 210000)

摘 要: 塔河油田奥陶系碳酸盐岩油藏部分区块已进入开发中后期, 油水关系极为复杂, 钻井风险极大。为解决剩余油分布预测的问题, 在塔河油田 TH10X 井区开展了时频电磁剩余油探测攻关试验。针对碳酸盐岩缝洞型油藏强非均质性的特点, 通过相互垂直的双源电磁场激发、100 m×100 m 阵列三维数据采集, 获得高质量三维电磁数据。在此基础上, 开展电阻率约束反演、极化率约束反演和差分异常提取, 获得了研究区电阻率异常、极化率异常及双频相位差分异常, 最后利用实钻井生产数据进行标定, 圈定剩余油分布潜力区。后经钻井验证, 2#潜力点存在丰富剩余油, 证实了方法的有效性。

关键词: 时频电磁法; 塔河油田; 剩余油; 双频相位差
中图分类号: P631; P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)04-0655-10

0 引言

我国新疆塔里木盆地塔河碳酸盐岩缝洞型油藏发育着多种类型、多个尺度的储集体, 主要有多种形态的大型溶洞、溶蚀孔、大断裂以及溶蚀裂缝, 其中孔、洞是油气的主要储集空间, 裂缝则起连通作用, 是油气的主要渗流通道[1-3]。由于多期岩溶叠加后期改造作用, 造成储层非均质性极强、空间结构及连通关系十分复杂[4-6]。开发实践表明, 溶洞和裂缝的空间配置关系决定了井间连通性和剩余油分布。前人从断裂—裂缝的测井识别、地震预测以及地质建模和数值模拟等多角度开展了储集体表征及油气预测的研究, 取得了很多积极进展[7-10]。但随着塔河碳酸盐岩油藏进入大规模注水注气提高采收率阶段, 油井含水率不断增高, 油水关系变得极为复杂, 导致开发井部署风险剧增, 须新的技术手段辅助地震资料共同预测剩余油, 以此来支撑塔河碳酸盐岩油藏的剩余油挖潜及提高采收率。

近年来快速发展起来的时频电磁法, 是一种新兴的电磁方法, 在油气、金属矿产和清洁能源勘查等领域得到了广泛的应用[11-14]。王有涛等[15] 以淮北缘石北构造带时频电磁数据为基础, 通过分层电性建模和反演, 获得电阻率和极化率剖面, 圈定含油气有利目标。于波等[16] 针对鄂尔多斯盆地侏罗系河道砂油藏针对储层薄、油藏小的特点, 设计了双侧双源激发、多线接收的时频电磁采集方案, 通过双源时频电磁联合反演和基于深度学习的多参数智能油气预测, 所部署的新井获得了工业油气流。杨俊等[17] 在宝藏—云锦向斜开展时频电磁法页岩气勘探, 通过弱异常信息提取和井震双控约束反演等关键技术, 探明了奥陶系龙马溪组龙一 1 亚段各小层的电阻率和极化率分布特征, 综合考虑目标页岩层段电阻率异常和极化率异常, 预测出页岩气勘探有利区 4 个;

收稿日期: 2025-03-21; **修回日期:** 2025-08-15
第一作者: 文欢(1987-), 女, 副研究员, 2012 年毕业于西南石油大学, 主要从事油气地球物理勘探工作。Email: wenhuan127@126.com

石艳玲等[18]利用时频电磁法在辽河 HX 凹陷火成岩开展油气预测，通过电阻率、极化率反演，结合实钻井产油情况，建立电阻率、极化率异常分级评价模板，识别多个油气有利区。葛大壮等[19]利用时频电磁资料获得了乌恰—阿图什构造带电阻率及极化率剖面，明确了其构造特征及油气有利区，并用钻井验证了预测结果的准确性。

前人研究成果证实，时频电磁法在不同类型储层油气目标识别方面均具有很好的效果。鉴于此，本文针对塔河油田碳酸盐岩缝洞型油藏，选取剩余油丰富的 TH10X 井区，开展时频电磁采集（观测系统设计、激发参数、观测参数）、数据处理（电阻率约束反演、极化率约束反演、差分相位异常）及多信息综合解释（地震、电磁、实钻井生产数据）研究，解决深层碳酸盐岩油藏剩余油预测问题。生产井资料证实了本文的研究成果，即时频电磁法可为碳酸盐岩油藏剩余油的直接预测提供有效技术支撑。

1　研究区概况

研究区位于塔里木盆地北部沙雅隆起阿克库勒凸起南缘斜坡带（图 1），该区经历了加里东期、海西期及印支—燕山期多期构造运动的叠加改造，构造—沉积演化复杂，形成了多层次的构造—沉积格局。其中，在加里东中晚期奠定凸起雏形，海西早期受区域性挤压抬升作用，形成向西南倾伏的鼻凸构造[20-21]。区域露头资料及钻井揭示，工区内前震旦系主要为浅变质的褶皱基底，其上发育震旦纪至第四纪沉积序列，受隆升剥蚀影响，缺失泥盆系、志留系、上石炭统及中、上侏罗统。表 1 为塔河油田 10 区地层简表。区内已钻井证实奥陶系岩溶缝洞型储层主要发育于上奥陶统良里塔格组和中—下奥陶统。

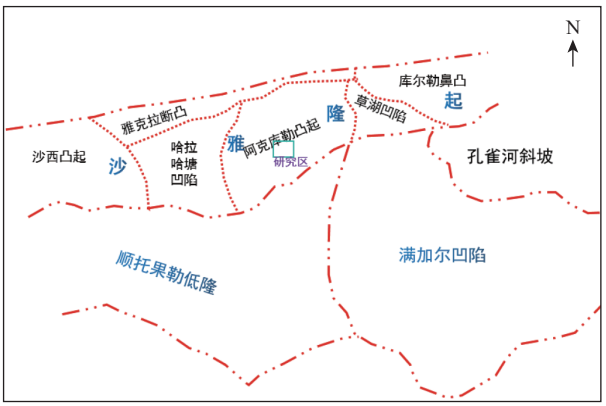


图 1　塔河 TH10X 井区构造位置

Fig. 1　Structural location of wellblock TH10X in Tahe Oilfield

研究区发育一条 NNW 向主要断裂及多条 NE、NW 及近 EW 向次级断裂，沿断裂发育断控岩溶缝洞型储层。区内目前共有开发井 16 口，其中，低产

表 1　塔河 TH10X 井区地层

Table 1　Stratigraphic summary of wellblock TH10X in Tahe Oilfield

地层					深度/m
界	系	统	群	组	
新生界	第四系				80
	新近系	上新统		库车组	1 870
		中新统		康村组	2 872
				吉迪克组	3 186
	古近系	渐新统		苏维依组	3 220
		古—始新统	库姆格列木群		3 285
中生界	白垩系	下统	卡普沙良群	巴什基奇克组	3 962
					4 002
	侏罗系	下统			4 406
		上统		哈拉哈塘组	4 535
	三叠系	中统		阿克库勒组	4 832
		下统		柯吐尔组	4 928
古生界	二叠系	中统		开派兹雷克组	4 990
	石炭系	下统		卡拉沙依组	5 434
				巴楚组	5 563
	奥陶系	上统		桑塔木组	5 590
				良里塔格组	5 695
				恰尔巴克组	5 712
		中统		一间房组	5 790
		下统		鹰山组	5 890

油井 3 口, 中高产油井 13 口, 当前高含水油井 10 口, 见图 2, 油水关系复杂, 剩余油分布预测困难。

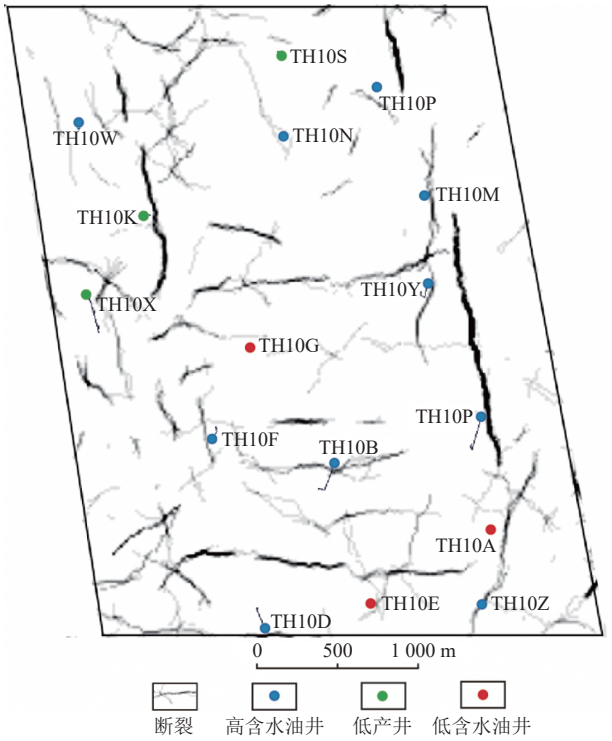


图 2　工区开发井位分布

Fig. 2　Development well distribution of block TH10X

依据研究区实钻井资料开展电性特征分析, 统计 16 口开发井电阻率测井曲线及录井岩样信息, 将研究区地层从上到下大致可分为“中低—中高—低—高—中”5 套电性层。依次为: ①第四系—新近系中新统吉迪克组, 地层以细砂岩、粉砂岩为主, 电阻率较低; ②古近系渐—古新统苏维依组—侏罗系下统, 地层以中砂岩、砾砂岩为主, 表现为中高电阻率; ③三叠系上统哈拉哈塘组—石炭系下统巴楚组, 地层包括细砾岩、泥岩、石英砂岩等, 表现为低电阻率; ④奥陶系上统桑塔木组—恰尔巴克组, 地层为灰质泥岩、泥晶灰岩, 电阻率高; ⑤奥陶系中—下统, 地层为砂屑灰岩, 电阻率中高。

2　时频电磁法

时频电磁法(time-frequency electromagnetic method, TFEM)是一种结合时间域和频率域电磁勘探方法的技术。利用该技术进行剩余油识别的核心是油气藏的激发极化特性(IP)和油气藏与围岩之间的电性差异(R)。剩余油储层通常表现为高电阻率(因烃类流体导电性差, 通常 10^2~10^4 Ω·m), 而含水区域或围岩电阻率较低。油、气、水与固体物质之间存在双电层, 在外电场作用下形成充放电效应(激发极化效应), 产生极化率异常, 这一特性通过频率域数据可提取。时频电磁法采用大功率接地导线(*AB* 电极)发射非间隙方波信号(如正负交替方波), 通过多频激发同时获得时间域和频率域电磁响应, 从而获取地下介质的电阻率、极化率等多维信息。发射电流波形设计(基频与谐波组合)可优化不同深度目标的探测能力, 低频信号穿透深部储层, 高频信号刻画浅层细节。

时频电磁法观测系统由发射和接收两部分组成。发射端大功率恒流源(75~175 kVA)配合长导线(5~10 km), 增强信号穿透深度。接收端多通道接收机同步采集电场(E_x)和磁场(H_z)分量, 拓展数据维度, 地面采用非纵排列, 获取三维资料。时频电磁野外观测系统布设见图 3。

基于水平电流源的电磁场解析表达式, 推导利

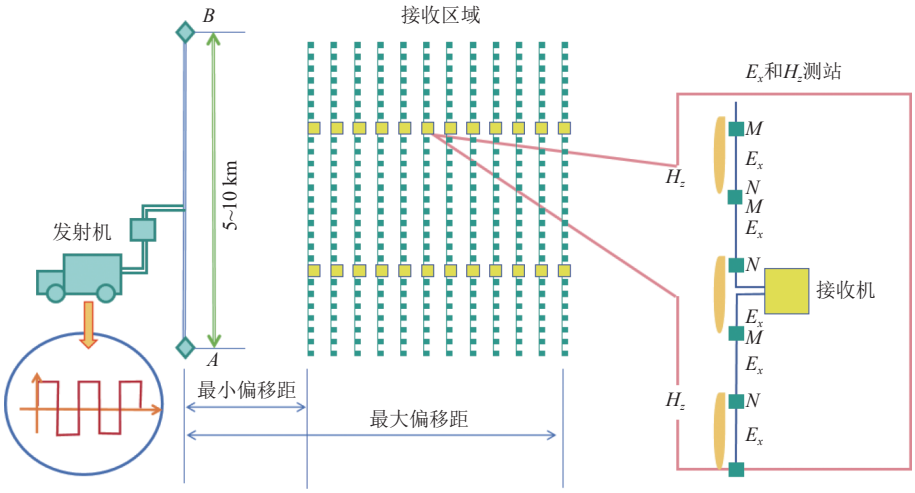


图 3　时频电磁法野外施工布置示意

Fig. 3　Schematic layout of TFEM field survey operations

用水平电场分量 E_x 计算地下电阻率的计算公式[22]：

$$\rho_a = K_{E-E_x}\frac{\Delta V_{\overline{MN}}}{I}\frac{1}{f_{E-E_x}(\mathrm{i}kr)}, \tag{1}$$

式中：$K_{E-E_x}=\dfrac{2\pi^3}{\mathrm{d}L\cdot\overline{MN}}$为仅与观测装置的几何形状相关的系数；$f_{E-E_x}(\mathrm{i}kr)=1-3\sin^2\varphi+\mathrm{e}^{-\mathrm{i}kr}(1+\mathrm{i}kr)$为电磁效应函数；$\varphi$为收发角度；$k$为波数；$r$为发射电流源 AB 中心与测量电极对 MN 之间的距离；I为发射电流源 AB 的电流强度；dL为发射电流源 AB 的长度。

极化率理论上反映激发极化强度，在剩余油研究中与目标含油气饱和度和体积有关，即与双相介质中双电层的特性和有效双电层数量有关。极化率一般采用 Cole-Cole 模型进行拟合[23]。Cole-Cole 模型是一种用于描述介质极化或电阻率频散现象的数学模型，通过常相位元件（CPE）和分布参数，构建了能够描述非均匀介质弛豫行为的等效电路。在地球物理中，Cole-Cole 模型用于描述岩石的复电阻率$\rho(\omega)$：

$$\rho(\omega)=\rho_0\left[1-\frac{\eta}{1+(1-\eta)(\mathrm{i}\omega\tau)^c}\right], \tag{2}$$

式中：ρ_0为高频极限电导率；τ为弛豫时间；c为频散系数（$0\leqslant c\leqslant 1$）；η为极化率；$\omega=2\pi f$，f为频率。极化率η通过拟合频率域相位或振幅异常获得：$\eta\propto\dfrac{\phi(\omega_1)-\phi(\omega_2)}{\ln(\omega_1-\omega_2)}$，$\varphi$为电场相位响应。

3　数据采集

TH10X 井区碳酸盐岩缝洞型油藏埋深大于 5 500 m，储层规模小（小于 50 m），各向异性强。针对油藏特点，设计大功率、垂直方向双源激发及高密度三维观测的采集方案。如图 4 所示，在工区的北侧和西侧各部署 1 个发射源，工区内测点采用 100 m×100 m 的网格进行三维测量，测量电场 E_x 和磁场 H_z 两个参量。在开展时频电磁数据采集前，根据目标层深度和地层一维层状电阻率模型，通过室内正演模拟的方式，分析时频电磁法探测该研究区深层地质体的分辨能力，以及不同施工参数情况下的异常响应特征，设定采集参数包括收发距 R、发射源 AB 长度、频率。

参考研究区电性层分析及地质资料，建立了图 5 所示的一维层状电阻率模型，目标层位的深度范围为 5 700~6 000 m。根据模型计算得到目的层段需要的激发信号周期是 18~20 s，为保证满足深层油气识别要求，激发信号周期设计为 0.064~40 s，见表 2。

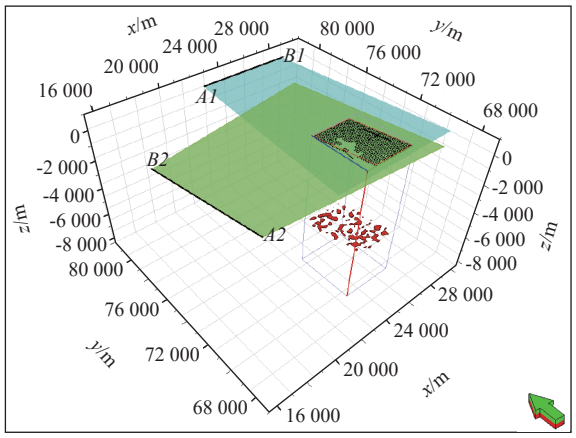


图 4　双源时频电磁三维采集工作布置示意

Fig. 4　Schematic layout of 3D dual-source TFEM acquisition operations

激发源长度指激发电极 A 和电极 B 之间的距离，本次通过改变 AB 的长度，来模拟最佳激发源长度，AB 的改变范围为 1~10 km，每 1 km 模拟一次，共计 10 次，模拟参数为电场分量 E_x 和磁场分量 H_z。一般来说，在同样电流大小情况下，AB 长度越长，信号越强。然而，在实际施工时，AB 长度越长，线阻就越大，受发射额定功率限制，激发电流将变小，采集的资料信噪比会降低；AB 长度太短，影响信号强度。同时，时频采集时，背景噪声一般为 0.02 mV，要想采集到好的数据，一般要满足信噪比大于 5 的要求，即信号值应该大于 0.1 mV。如图 6 所示，模拟结果表明，1~4 km 信号值小于 0.1 mV 不符合要求，8~10 km 信号衰减幅度较大，因此，综合考虑适用的激发源长度取值范围为 5~8 km。

收发距是发射中心点与观测点测线之间的平行距离。本次通过改变收发距 R 的大小，来模拟最佳收发距离，R 的改变范围为 1~15 km，每 1 km 模拟一次，共计 15 次，模拟参数为电场分量 E_x 和磁场分量 H_z。一般来说，收发距越大，从曲线中得到的地质信息越丰富，但收发距太大，信号则太微弱，信噪比低。当收发距太小时，接收的信号又会受场源的干扰影响。如图 7 所示，模拟结果表明，适用于本工区的收发距取值范围为 6~9 km。

4　数据处理

数据处理主要包括数据预处理、异常计算和反演。数据处理完成后获得差分异常、三维电阻率和三维极化率数据体。

4.1　三维电阻率反演

三维电阻率反演算法是从电阻率测量数据恢复

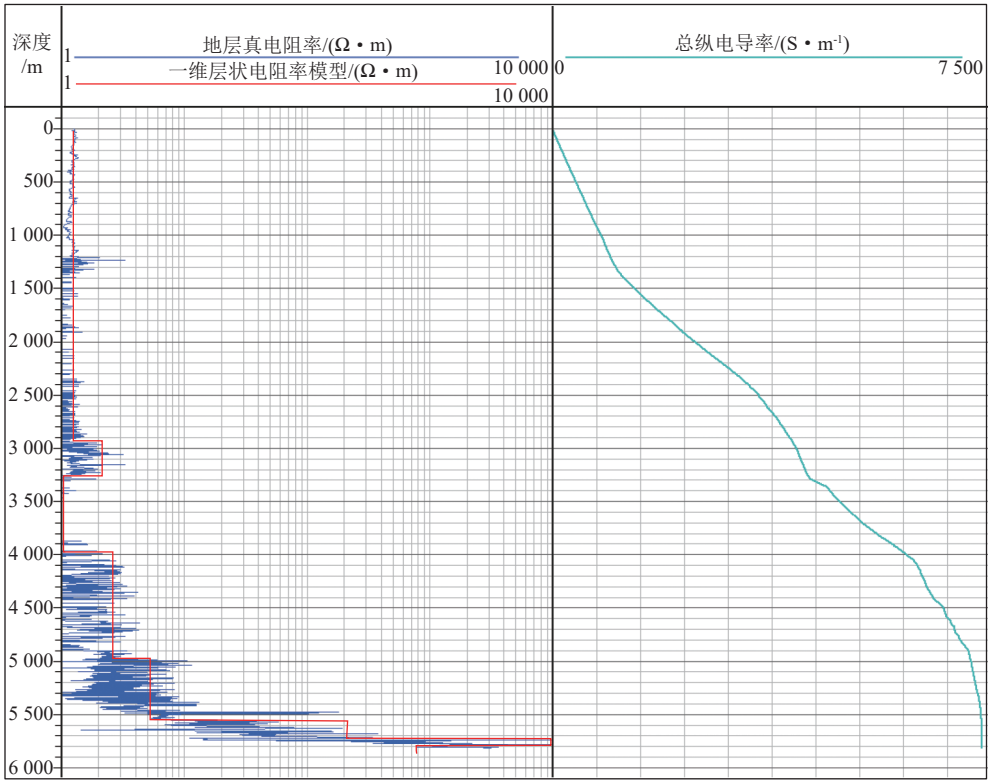


图 5　一维层状电阻率模型与总纵电导率拟合曲线

Fig. 5　Fitting curves for the 1D layered resistivity model and total longitudinal conductivity

表 2　三维时频电磁激发信号发射周期

Table 2　Transmission of 3D TFEM excitation signals

序号	周期/s	采样时长/s	勘探深度/m	序号	周期/s	采样时长/s	勘探深度/m
1	0.064	32.768	359.92	13	5.52	176.64	3 344.06
2	0.128	65.536	508.98	14	6.04	193.28	3 491.88
3	0.256	131.072	719.86	15	6.8	217.6	3 710.69
4	0.512	131.072	1 018.03	16	7.92	253.44	4 008.00
5	1.024	262.144	1 439.35	17	8.992	287.744	4 270.23
6	1.52	389.12	1 753.88	18	10	160	4 498.97
7	2.048	262.144	2 036.59	19	12.8	204.8	5 094.08
8	2.5	320	2 249.48	20	16.384	262.144	5 760.34
9	3	384	2 465.42	21	20	320	6 362.50
10	4.096	262.144	2 880.17	22	26.8	214.4	7 396.26
11	4.5	288	3 019.51	23	32.768	262.144	8 080.39
12	5.04	322.56	3 197.28	24	40	320	8 997.94

地下电阻率分布的数学方法, 算法核心是将测量数据与地下电阻率模型联系起来, 通过迭代优化求解反问题[24]。其方法流程涵盖目标函数构建、约束条件设计及优化求取策略, 具体实现步骤如下:

①目标函数构建

反演问题的数学表达以最小化目标函数为核心, 其表达式为[25]:

$$\Phi(m)=\Phi_d(m)+\lambda\Phi_m(m), \tag{3}$$

式中: m表示模型参数(电阻率对数化值); Φ_d为数据拟合项; Φ_m为模型约束项; λ为正则化因子。数据拟合项

$$\Phi_d=\sum_{i=1}^{N}\omega_i\left\|d_i^{\mathrm{obs}}d_i^{\mathrm{pre}}(m)\right\|^2, \tag{4}$$

式中: d_i^{obs}和d_i^{pre}分别为第i个频点的观测数据与正演响应; ω_i为数据权重因子; 模型约束项$\Phi_m=\alpha_s\Phi_{\mathrm{smooth}}+\alpha_p\Phi_{\mathrm{prior}}+\alpha_b\Phi_{\mathrm{bound}}$, 平滑约束($\Phi_{\mathrm{smooth}}$)通过Tihonov正则化强制模型空间连续性: $\Phi_{\mathrm{smooth}}=\|L(m-m_{\mathrm{ref}})\|^2$, 式中L为拉普拉斯算子, m_{ref}为先验参考模型; 先验约束(Φ_{prior})引入测井信息, 约束特定区域电阻率值: $\Phi_{\mathrm{prior}}=\sum_{j=1}^{M}\left\|m_j-m_j^{\mathrm{well}}\right\|^2$, 其中$m_j^{\mathrm{well}}$为测井标定的电阻率值; 边界约束($\Phi_{\mathrm{bound}}$)限定电阻率物理

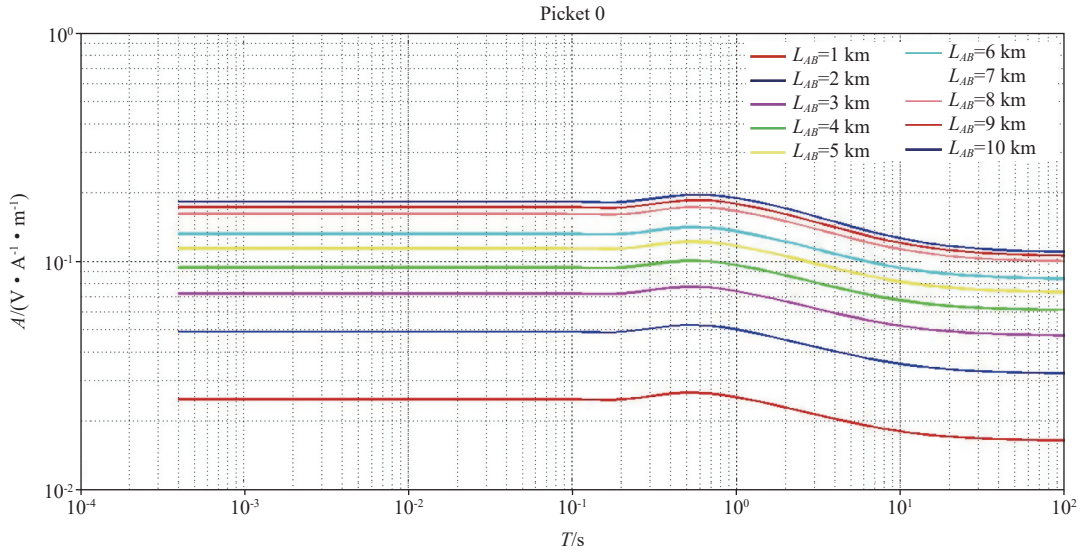


图 6　不同激发源长度模拟电场振幅 *A* 曲线

Fig. 6　Simulated electric field amplitude *A* response curves for different source lengths

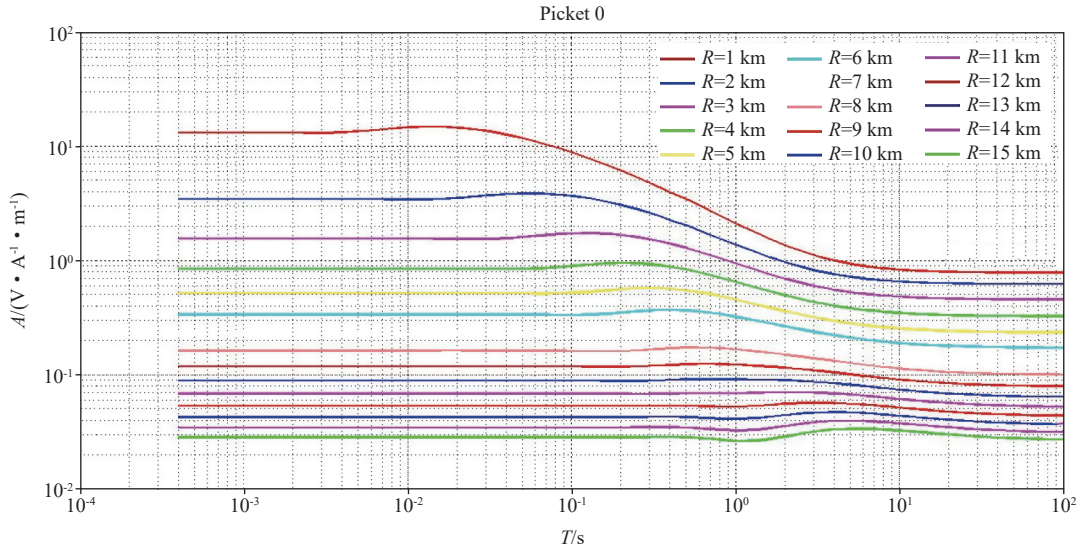


图 7　不同收发距模拟电场振幅 *A* 曲线

Fig. 7　Simulated electric field amplitude *A* response curves for different T_x-R_x offsets

范围：

$$\Phi_{\text{bound}} = \sum_{k=1}^{K} \max\left(0, m_k - m_k^{\max}, m_k^{\min} - \mathrm{m}_k\right)^2 。 \qquad (5)$$

②约束条件设计

为降低反演多解性，本次研究中结合多源先验信息进行约束：

Ⅰ 构造约束：本次研究区为成熟开发区，具有精细地震资料解释成果，通过建立三维构造模型，定义电阻率突变区；

Ⅱ 物性约束：利用测井数据标定目标层电阻率范围。

③优化求解策略

本次反演采用共轭梯度法求解，通过求解敏感度矩阵的转置乘以向量的形式，避免了直接求取拟矩阵，提高了计算效率[26]。

最终获得研究区 TH10X 井区三维电阻率反演数据体，从剖面（图 8）可见团块状异常。在此基础上，根据研究区实钻井缝洞发育段深侧向电阻率的值域范围标定本次反演的缝洞异常电阻率阈值为 200 Ω·m，通过异常增强提取目的层段团块状异常，形成了电阻率识别的异常体空间分布图（图 9），与三维地震数据识别的缝洞体吻合较好。

4.2　极化率约束反演

极化率约束反演通过引入先验信息或物理关系约束，优化地下极化率参数。本次采用 Pearson 相关约束法[27]。在电阻率反演基础上，利用极化率与电

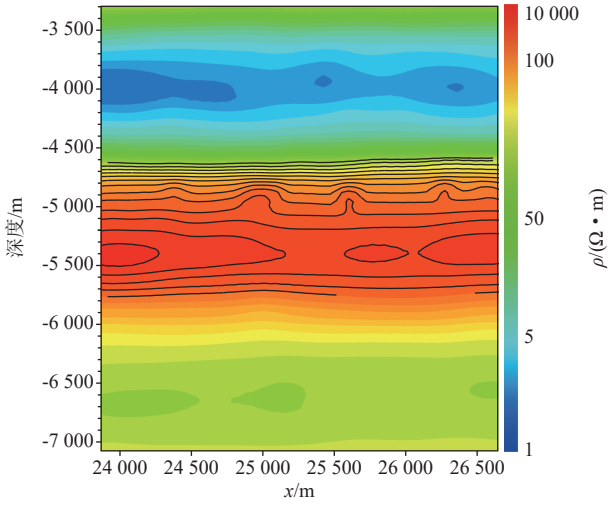


图 8　L100 线电阻率反演剖面

Fig. 8　Resistivity inversion section along Line L100

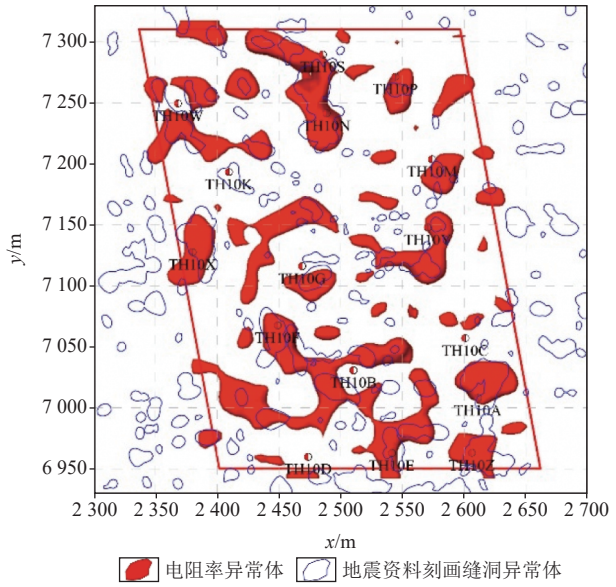


图 9　目的层段电阻率异常分布

Fig. 9　Resistivity anomaly distribution of the target reservoir interval

阻率的统计相关性, 在目标函数中引入相关系数项, 将目标函数扩展为

$$\Psi = \left\| \boldsymbol{W}_d (d_{\text{obs}} - d_{\text{pre}}) \right\|^2 + \lambda \left\| \boldsymbol{W}_m (m - m_{\text{ref}}) \right\|^2 + \gamma \left\| \nabla\rho \cdot \nabla\eta \right\|^2, \quad (6)$$

式中: $\boldsymbol{W}_d$为数据权重矩阵; $\boldsymbol{W}_m$为模型光滑矩阵; m_{ref}为参考模型。同样利用共轭梯度法求解矩阵。

最终获得研究区 TH10X 井区三维极化率反演数据体。根据研究工区工业油气流井极化率统计结果, 标定目的层含油气储层的极化率阈值为 3.6%, 以此阈值(大于 3.6%)提取目的层段极化率异常, 形成极化率异常体分布图(图 10), 与三维地震数据识别的缝洞体吻合较好。

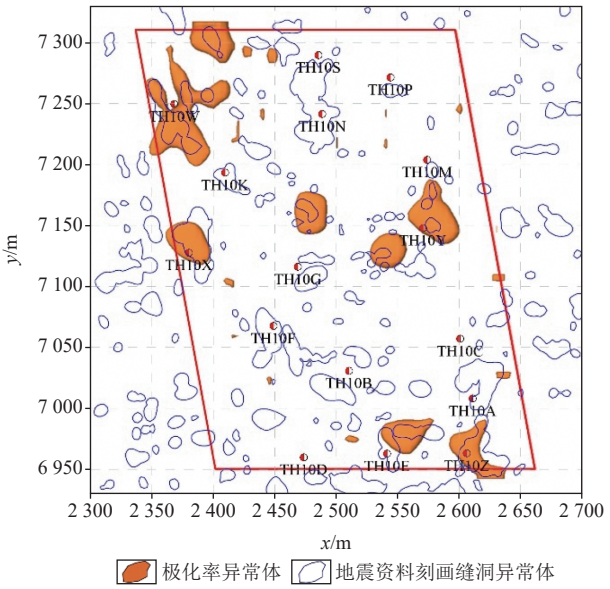


图 10　极化率约束反演异常体分布

Fig. 10　Distribution of anomalous bodies from chargeability-constrained inversion

4.3　双频相位差异常提取

储层含油时具有很强的激发极化效应, 电磁波在穿过含油气储层时, 与穿过不含油气储层对比, 会产生相位参数上的延迟[28]。提取双频相位差异常通过量化高低频电磁响应的相位偏移, 并为地下极化体(含油气储层)的识别提供高分辨率电化学特征参数。

通过测量两种频率(本次选择频率比为 3 ∶ 1, f_H= 3f_L)下的电位差响应ΔV_H和ΔV_L, 提取相位差异常:

$$\Delta\phi = \phi_L - \phi_H = \arctan\left(\frac{\text{Im}(V(f_L))}{\text{Re}(V(f_L))}\right) - \arctan\left(\frac{\text{Im}(V(f_H))}{\text{Re}(V(f_H))}\right). \quad (7)$$

为了捕捉目的层的极化效应及强度, 低频f_L选择原则上要求其探测深度要略大于目的层的埋深。本次在频率的选择时, 通过趋肤深度反算所需频率。趋肤深度是定义电场在良导体内衰减到 1/e(即 36.8%)时所深入的距离, 计算公式如下:

$$h = 503\sqrt{\frac{\rho}{f}} = 503\sqrt{\rho T}, \quad (8)$$

式中: h表示趋肤深度; f表示频率; ρ表示在频率f时对应的电阻率。

本工区内剩余油的缝洞型储层埋藏深度较大(5 700~6 000 m), 根据前述研究中建立的一维电阻率模型进行计算, 当周期达到 20 s, 即频率为 0.05 Hz 时, 趋肤深度为 6 362 m, 略深于目的层, 因此选择f_L=0.05 Hz。图 11 为最终得到的双频相位差平面图。

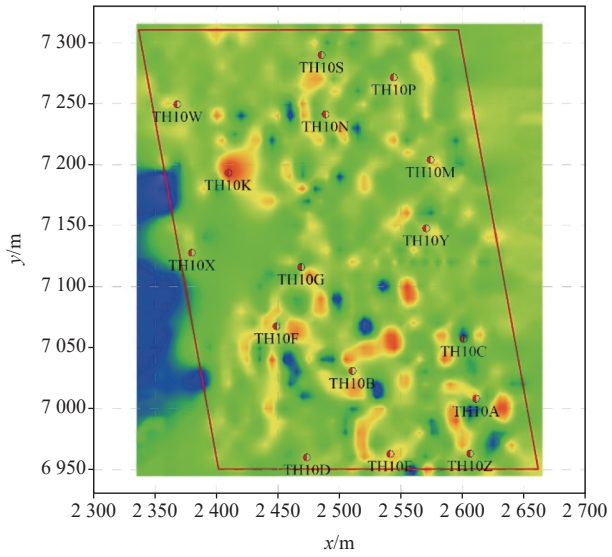


图 11　双频相位差异常平面

Fig. 11　Anomaly of dual-frequency phase differential

5　剩余油有利分布区预测

剩余油有利分布区的综合预测，主要遵循以下技术路线：按照“从已知到未知”的原则，综合双频相位差圈定的二维平面范围、电阻率异常体、极化率异常体以及地震资料刻画的缝洞储集体，利用工区内实钻井的生产情况，标定各参数指示阈值，综合圈定剩余油分布有利区。

图 12 中标记的 4 口实钻井为工区内阶段累积产量较高的井（表 3 为详细生产信息），蓝色封闭线条为三维地震刻画的缝洞储集体。可以看出，4 口钻井与综合预测的剩余油有利分布区（图 12 中暖色

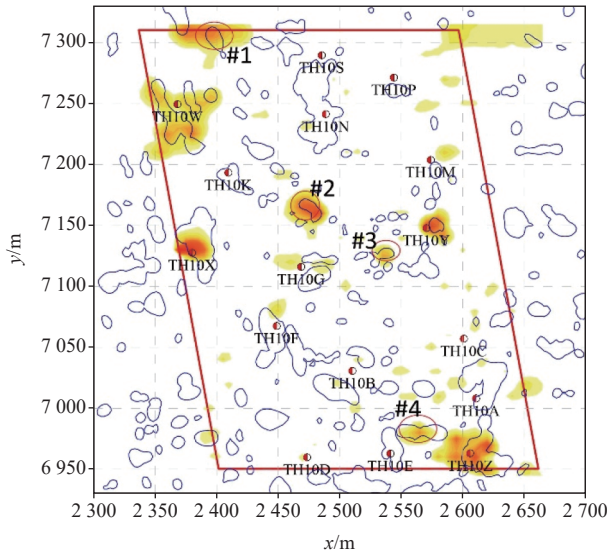


图 12　多参数联合解释成果

Fig. 12　Integrated interpretation results with multi-parameter constraints

表 3　单井生产数据

Table 3　Production data sheet for individual wells

井名	开井日期	初期日产/($t\cdot d^{-1}$)	含水率/%	阶段日产/($t\cdot d^{-1}$)	阶段累产/(10^4 t)
TH10W	2013年5月	23.1	21	15	5.3
TH10X	2013年1月	40.5	1	29	10.5
TH10Y	2013年8月	64.9	0	10	5.6
TH10Z	2013年8月	45	0	20	5.6

块）有很好的对应关系，以此为依据，圈定出未控制的#1、#2、#3、#4 共 4 个剩余油有利区。钻井证实了 2#目标剩余油的存在，初期日产 35 t/d，累计产油 1.1×10^4 t。

6　结论

1）通过方法论证及正演模拟，形成了针对深层碳酸盐岩缝洞型油藏的时频电磁野外采集方案及参数设计方案，对类似地质条件区域的时频电磁数据采集具有指导意义。

2）综合应用地震资料和测井资料构建约束模型，开展电阻率约束反演，在此基础上通过异常增强技术提取目的层段团块状异常，与地震刻画的缝洞储集体吻合较好，证实了方法的可靠性。

3）引入 cole-cole 模型，在地震资料、电阻率异常体综合约束下，开展极化率约束反演，获得三维极化率异常体。

4）提取双频相位差异常通过量化高低频电磁响应的相位偏移，识别地下极化体（含油气储层）；通过趋肤深度计算方法选取略深于目的层探测深度的频率值，获得目的层段双频相位差异常，指示目的层段油气平面分布范围。

5）以实钻井生产情况为依据，综合双频相位差、电阻率异常体、极化率异常体及地震刻画缝洞体，形成多维多参数剩余油分布综合预测方法，识别了研究工区 4 个潜力目标，后经钻探证实 2#目标剩余油的存在，证实方法的有效性。

参考文献（References）：

[1]　商晓飞，段太忠，张文彪，等. 断控岩溶主控的缝洞型碳酸盐岩内部溶蚀相带表征——以塔河油田 10 区奥陶系油藏为例 [J]. 石油学报，2020，41（3）：329−341.
Shang X F，Duan T Z，Zhang W B，et al. Characterization of dissolution facies belt in fracture-cavity carbonate rocks mainly controlled by fault-controlling karst：A case study of Ordovician reservoirs in the Block 10 of Tahe oilfieid[J]. Acta Petrolei Sinica，2020，41（3）：329−341.

[2] 廖涛, 侯加根, 陈利新, 等. 塔北哈拉哈塘油田奥陶系岩溶储层发育模式 [J]. 石油学报, 2015, 36(11): 1380−1391.
Liao T, Hou J G, Chen L X, et al. Evolutionary model of the Ordovician karst reservoir in Halahatang oilfield, northern Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(11): 1380−1391.

[3] 李阳, 范智慧. 塔河奥陶系碳酸盐岩油藏缝洞系统发育模式与分布规律 [J]. 石油学报, 2011, 32(1): 101−106.
Li Y, Fan Z H. Developmental pattern and distribution rule of the fracture-cavity system of Ordovician carbonate reservoirs in the Tahe Oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(1): 101−106.

[4] 李阳, 金强, 钟建华, 等. 塔河油田奥陶系岩溶分带及缝洞结构特征 [J]. 石油学报, 2016, 37(3): 289−298.
Li Y, Jin Q, Zhong J H, et al. Karst zonings and fracture-cave structure characteristics of Ordovician reservoirs in Tahe oilfieid, Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(3): 289−298.

[5] 漆立新, 云露. 塔河油田奥陶系碳酸盐岩岩溶发育特征与主控因素 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(1): 1−12.
Qi L X, Yun L. Development characteristics and main controlling factors of the Ordovician carbonate karst in Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(1): 1−12.

[6] 倪新锋, 杨海军, 沈安江, 等. 塔北地区奥陶系灰岩段裂缝特征及其对岩溶储层的控制 [J]. 石油学报, 2010, 31(6): 933−940.
Ni X F, Yang H J, Shen A J, et al. Characteristics of Ordovician limestone fractures in the northern Tarim Basin and their controlling effects on karst reservoirs[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(6): 933−940.

[7] 张娟, 谢润成, 杨敏, 等. 塔河油田主体区下奥陶统小尺度缝洞体形成机制与分布预测 [J]. 地学前缘, 2023, 30(4): 51−64.
Zhang J, Xie R C, Yang M, et al. Formation mechanism and distribution prediction of fine-fracture pores in the Lower Ordovician in Tahe oilfield[J]. Earth Science Frontiers, 2023, 30(4): 51−64.

[8] 丁立明, 马海陇, 王震, 等. 基于变系数的强反射分离方法及应用—以塔河地区为例 [J]. 石化技术, 2022, 29(9): 171−172, 175.
Ding L M, Ma H L, Wang Z, et al. Strong reflection separation method based on variable coefficient and its application —Taking Tahe Area as an example[J]. Petrochemical Industry Technology, 2022, 29(9): 171−172, 175.

[9] 王震, 邓光校, 文欢, 等. 塔河油田碳酸盐岩叠前裂缝预测技术应用分析 [J]. 工程地球物理学报, 2018, 15(1): 65−72.
Wang Z, Deng G X, Wen H, et al. Application of prestack fracture prediction technology for carbonate reservoirs in Tahe Oilfield[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2018, 15(1): 65−72.

[10] 王震, 文欢, 邓光校, 等. 塔河油田碳酸盐岩断溶体刻画技术研究与应用 [J]. 石油物探, 2019, 58(1): 149−154.
Wang Z, Wen H, Deng G X, et al. Fault-karst characterization technology in the Tahe Oilfield, China[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(1): 149−154.

[11] 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 TFEM in deep geothermal exploration at Jinniuhu area[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2024, 21(1): 81−91.

[12] 岑超, 李星, 阮娟, 等. 时频电磁法探测滇东北会泽铅锌矿主要控矿构造空间展布 [J]. 四川有色金属, 2023(4): 54−56.
Cen C, Li X, Ruan J, et al. Time frequency electromagnetic method for detecting the spatial distribution of the main ore-controlling structures in the Huize lead-zinc deposit in northeastern Yunnan[J]. Sichuan Nonferrous Metals, 2023(4): 54−56.

[13] 董卫斌, 李维, 覃荆城, 等. 时频电磁法在油气探测方面的应用及进展 [J]. 物探装备, 2023, 33(6): 351−353.
Dong W B, Li W, Qin J C, et al. Application and progress of TFEM in hydrocarbon exploration[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2023, 33(6): 351−353.

[14] 程正璞, 连晟, 魏强, 等. 雄安新区深部雾迷山组热储层时频电磁法探测研究 [J]. 物探与化探, 2023, 47(6): 1400−1409.
Cheng Z P, Lian S, Wei Q, et al. Research on time-frequency electromagnetic method detection of Wumishan Formation thermal reservoir in deep Xiongan New Area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(6): 1400−1409.

[15] 王有涛, 何展翔, 陈学国, 等. 基于物性分析建模的时频电磁反演及储层评价——以准北缘石北构造带为例 [J]. 石油地球物理勘探, 2022, 57(6): 1489−1497,1264.
Wang Y T, He Z X, Chen X G, et al. TFEM inversion with petrophysical constraints and reservoir evaluation: Case study of Shibei structural belt, Junggar Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2022, 57(6): 1489−1497,1264.

[16] 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.

[17] 杨俊, 刘雪军, 王财富, 等. 时频电磁法在深层页岩气有利区预测中的应用 [J]. 石油地球物理勘探, 2024, 59(6): 1447−1457.
Yang J, Liu X J, Wang C F, et al. Application of time-frequency electromagnetic method in predicting favorable areas for deep shale gas[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2024, 59(6): 1447−1457.

[18] 石艳玲, 刘雪军, 魏强, 等. 利用时频电磁法识别辽河盆地东部凹陷火成岩油气目标 [J]. 地质与资源, 2024, 33(1): 49−55.
Shi Y L, Liu X J, Wei Q, et al. Identification of igneous rock reservoirs in eastern depression of Liaohe basin by time-frequency electromagnetic method[J]. Geology and Resources, 2024, 33(1): 49−55.

[19] 葛大壮, 高永才, 张振, 等. 时频电磁约束反演在乌恰-阿图什构造带晚古生界油气勘探中的应用 [J]. 物探化探计算技术, 2025, 47(2): 241−252.
Ge D Z, Gao Y C, Zhang Z, et al. Application of time-frequency electromagnetic constraint inversion in oil and gas exploration in the Late Paleozoic of the Ucha-Atushi tectonic structure[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 47(2): 241−252.

[20] 翟晓先. 塔里木盆地塔河特大型油气田勘探实践与认识 [J]. 石油实验地质, 2011, 33(4): 323−331.
Zhai X X. Exploration practice and experience of Tahe giant oil-and-gas field, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology and Experiment,

2011, 33(4): 323−331.

[21] 云露, 蒋华山. 塔河油田成藏条件与富集规律 [J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(6): 768−775.
Yun L, Jiang H S. Hydrocarbon accumulation conditions and enrichment rules in Tahe oilfield[J]. Oil & Gas Geology, 2007, 28(6): 768−775.

[22] 李竹强, 付国强, 谭绍泉, 等. 时频电磁法频率域视电阻率求取方法研究 [J]. Applied Geophysics, 2024, 21(2): 409−417,422.
Li Z Q, Fu G Q, Tan S Q, et al. Calculation and application of apparent resistivity in the frequency domain by TFEM[J]. Applied Geophysics, 2024, 21(2): 409−417,422.

[23] 代博帅, 黄鑫, 曹晓月, 等. 考虑激电效应的三维时移大地电磁法正演研究 [J]. 地球物理学进展, 2024, 39(4): 1565−1585.
Dai B S, Huang X, Cao X Y, et al. Forward modeling study of three-dimensional time-lapse magnetotelluric method considering induced polarization effect[J]. Progress in Geophysics, 2024, 39(4): 1565−1585.

[24] 郭来功, 戴广龙, 杨本才, 等. 多先验信息约束的三维电阻率反演方法 [J]. 石油地球物理勘探, 2018, 53(6): 1333−1340, 1350.
Guo L G, Dai G L, Yang B C, et al. Three dimensional resistivity inversion method with multiple prior information constraints[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2018, 53(6): 1333−1340, 1350.

[25] Tikhonov A N, Arsenin V Y. Solutions of ill-posed problems[M]. Winston, Washington, 1977.

[26] Zhang J, Mackie R L, Madden T R. 3-D resistivity forward modeling and inversion using conjugate gradients[J]. Geophysics, 1995, 60(5): 1313−1325.

[27] 满开峰, 殷长春, 刘云鹤, 等. 时间域航空电磁激发极化参数三维反演研究 [J]. 地球物理学报, 2023, 66(3): 1269−1280.
Man K F, Yin C C, Liu Y H, et al. 3D inversion of time-domain airborne EM data for IP parameters[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2023, 66(3): 1269−1280.

[28] 马学军, 侯海龙, 张庆, 等. 井地电磁法在塔河油田剩余油评价中的应用探索 [J]. 石油物探, 2025, 64(1): 174−186.
Ma X J, Hou H L, Zhang Q, et al. Exploratory application of a borehole-to-surface electromagnetic method in remaining oil evaluation in Tahe oilfield[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2025, 64(1): 174−186.

The application of time-frequency electromagnetic method in the detection of remaining oil in fractured-vuggy oil and gas reservoirs in the Tahe area

WEN Huan [1,2], DING Li-Ming [1,2], WANG Zhen [1,2], LI Jie [1,2], LI Zhong-Hua [3]

(1. *Key Laboratory for EOR of Fractured - Vuggy Carbonate Reservoir*, *SINOPEC*, *Urumqi*, 830011, *China*; 2. *Exploration & Development Research Institute of Northwest Oilfield Company*, *SINOPEC*, *Urumqi* 830011, *China*; 3. *Jiangsu Huadong* 814 *Geophysical Exploration Co.*, *Ltd.*(*Jiangsu Nonferrous Metals East China Geological Exploration Bureau*, *Team* 814), *Nanjing* 210000, *China*)

Abstract: In some blocks of the Ordovician carbonate reservoirs in the Tahe Oilfield, the development has entered the middle and late stages, and the oil-water relationship is extremely complex, with a high risk of drilling. To solve the problem of predicting the distribution of remaining oil, a research and development experiment on detecting remaining oil using time-frequency electromagnetic methods has been carried out in the TH10X well area of the Tahe Oilfield. Aiming at the characteristics of strong heterogeneity in fractured-vuggy carbonate reservoirs, high-quality three-dimensional electromagnetic data have been obtained through the excitation of dual-source electromagnetic fields that are perpendicular to each other and three-dimensional data collection with an array of 100 m×100 m. On this basis, the resistivity-constrained inversion, polarizability-constrained inversion, and differential anomaly extraction have been carried out, and resistivity, polarizability anomalies, and dual-frequency phase differential anomalies in the study area was obtained. Finally, the production data of the actual drilled wells was used for calibration, and the potential areas of remaining oil distribution have been delineated. Later drilling verification has shown that there is abundant remaining oil at the No. 2 potential point, confirming the effectiveness of the method.

Key words: time-frequency electromagnetic; Tahe area; remaining oil; dual-frequency phase difference

（本文编辑：王萌）