doi: 10.11720/wtyht.2026.1297
罗先中, 何展翔, 徐学贵, 等. 时频电磁技术研究综述: 技术、设备与应用[J]. 物探与化探, 2026, 50(2): 189-199. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1297
Luo X Z, He Z X, Xu X G, et al. Overview of time-requency electromagnetic techniques research: Technology, equipment and applications[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(2): 189-199. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1297

时频电磁技术研究综述: 技术、设备与应用

罗先中[1,2], 何展翔[3], 徐学贵[4], 谢涛[4], 蒋达军[5], 陈辉[1,2]
(1. 中国地质调查局 发展研究中心, 北京 100037; 2. 自然资源部 矿产勘查技术指导中心, 北京 100037; 3. 南方科技大学 地球与空间科学系, 广东 深圳 518055; 4. 四川省第九地质大队, 四川 德阳 618000; 5. 四川拓创探测科技有限公司, 四川 成都 610045)

摘 要: 时频电磁法(TFEM)是融合频率域人工源电磁法(CSEM)与瞬变电磁法(TEM)二者的优势发展而来的人工源电磁探测技术。该技术单次激发即可同步获取时域与频域电磁响应数据, 兼具大勘探深度、多参数反演、高信噪比与强抗干扰能力等特征, 为地下结构的精细刻画提供了技术支撑。本文系统阐述了 TFEM 的核心技术架构与国内外装备研发的演进脉络, 重点剖析了其在油气勘探、矿产勘查及地热资源调查 3 大领域的理论模型、应用现状与技术瓶颈。研究表明, TFEM 在探测深度与参数维度上有效突破了传统电磁法的局限, 与当前能源资源勘探所要求的高精度、大深度目标高度适配。然而, 其在矿产与地热领域的应用正处于规模化拓展的关键阶段, 其潜力有待进一步挖掘。未来, TFEM 将向地—空协同探测、三维/四维时移监测等方向拓展, 并将在多物理场耦合、智能反演算法等方面持续创新, 为其产业化应用与技术升级提供新动能。

关键词: 时频电磁法; 矿产资源; 地热资源; 石油天然气; 断裂检测; 3D 反演; 正演模拟
中图分类号: P631; P31 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-8918(2026)02-0189-11

0 引言

在全球能源格局深度调整与我国“双碳”目标推进的双重背景下, 能源资源安全与清洁低碳转型成为国家发展的战略重点。油气、矿产、地热等关键能源资源的勘探正逐步向大深度、复杂构造、强干扰环境延伸, 传统电磁勘探方法因存在勘探深度有限、观测参数单一、抗干扰能力不足、分辨率偏低等瓶颈, 难以满足当前“精准探测、高效评价”的核心需求[1-2]。开发兼具深部穿透能力、高信噪比、多参数观测优势的电磁探测技术及装备, 对突破资源勘探瓶颈, 支撑新一轮找矿突破战略行动具有重要意义[3]。

时频电磁法(time-frequency electromagnetic method, TFEM)作为融合频率域人工源电磁法(CSEM)与时间域瞬变电磁法(TEM)技术优势的新型人工源电磁探测方法, 自 20 世纪 90 年代在俄罗斯起步发展以来, 凭借“一次观测, 同步获取时频双域响应、多参数联合反演、宽观测域适配复杂环境”的独特技术特征, 逐步展现出大深度、高分辨率、强抗干扰能力的核心优势[4]。我国于 21 世纪初引进该技术后, 通过消化吸收与自主创新, 在设备研发、数据处理、行业应用等方面实现了跨越式发展, 不仅形成了从 150~300 kW 的系列化大功率发射系统, 研发了兼容电道、磁道、线圈等多传感器的节点式采集设备, 还建立了涵盖双域数据处理、多参数联合反演的技术体系[5-11]。截至目前, 时频电磁法已在石油天然气、页岩气、金属矿产、地热资源等多个领域实现规模化应用。相关行业标准的发布, 标志着该技术已成为我国能源资源勘探的常规手段之一。

收稿日期: 2025-08-22; **修回日期**: 2025-10-02
基金项目: 云南省重大科技专项计划项目(202402AB080006); 中国地质调查局项目([2025]SHZJ-02-001、DD202602109902、DD20230355、DD20230356、DD20230356、DD20230203902)
第一作者: 罗先中(1968-), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事抗干扰电磁理论、仪器开发与综合地球物理应用研究工作。Email: lxianzhong@mail.cgs.gov.cn
通讯作者: 何展翔(1962-), 男, 博士, 研究员, 主要从事地球电磁学和综合地球物理方法技术研究与应用。Email: hezx@sustech.edu.cn

本文系统梳理了时频电磁法的基本原理、工作装置与数据处理特征，全面总结国内外时频电磁设备的发展历程与核心技术参数，重点阐述该技术在油气探测、矿产勘查和地热勘探 3 大关键领域的应用现状、典型案例与数据处理技术进展，并结合当前技术瓶颈与应用需求提出下一步发展方向，旨在为相关领域的技术研发、工程应用与战略决策提供参考，推动该技术在我国能源资源勘探中发挥更大作用。

1　时频电磁基本原理及工作方式

1.1　基本原理

时频电磁法利用地面布置的大功率电性源，采用变频方波电流作为激发场源，进行电场、磁场分量的观测，通过一次性收发过程即可获得时间域电磁结果和频率域电磁结果。在传统电性源的近场区，TFEM 类似于电性源短偏移瞬变电磁法（LOTEM）；在远场区，TFEM 类似于可控源音频大地电磁法（CSAMT），通过对时域和频域数据的独立处理与联合反演实现对地下结构的精细探测[3]。

1.2　装置组成

时频电磁的工作装置由发射装置和接收装置两部分组成。发射装置为接地长导线地面电性源。接收装置分为接地电偶极和垂向磁传感器（或不接地线圈）。接地电偶极（*MN*）接收水平电场分量 E_x 或径向电场分量 E_y，垂向磁传感器或不接地线圈接收垂直磁场分量 H_z[6]。

地面电性源发射装置一般采用赤道装置，在场源（*AB*）一侧或两侧收发距 1~15 km 范围内进行观测。测量电偶极 E_x 方向应与激发场源（*AB*）平行，两者之间夹角不应大于 3°，测线或测网范围受激发场源（*AB*）两端的辐射线限制，辐射线相对于激发场源（*AB*）的夹角宜小于 90°，在施工困难地区，夹角宜小于 105°。装置示意见图 1。

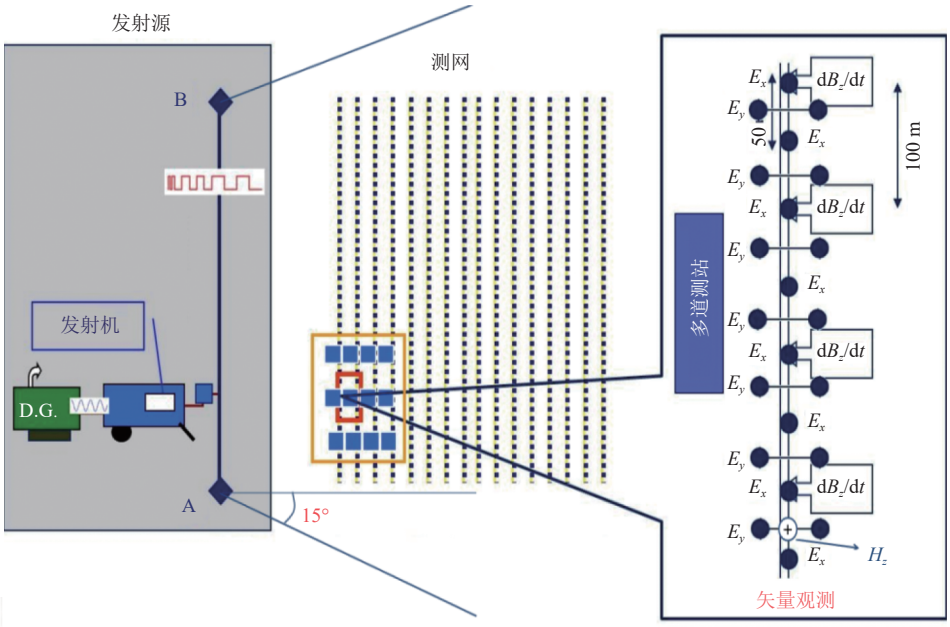


图 1　时频电磁观测系统及组成示意

Fig. 1　Schematic diagram of time-frequency electromagnetic observation system and its composition

施工时，一般在同点位布设一套电场和磁场接收装置，可根据工区电磁干扰环境及地质目标任务只布设一套电场（E_x）或磁场（H_z）装置。

1.3　数据处理

时频电磁数据处理系统可以结合多个电场、磁场分量进行时间域、频率域电阻率反演，获得电阻率和极化率剖面；通过定性分析可获得多个反应极化率信息参数。可针对单次采集数据计算获得时间域电磁结果和频率域电磁结果，并且可同时获得电阻率和极化率参数，见图 2。该处理技术有以下特点：

1) 可单独使用电道数据或磁道数据（磁棒或者线圈）分析时间域和频率域数据，也可进行联合反演提高反演结果的可靠性[6-7]；

2) 可通过电道或磁道的结果计算获得频率域极化率信息，即一次发射即可获得时间域电阻率、频率域电阻率以及频率域极化率等结果[8]；

3) 可提前进行正演模拟，针对实际地电模型设计适合的发射极距、收发距、目标频带等[10]；

4) 发射功率最大可达 300 kW 以上，探测深度达 5~8 km 以上，探测深度大[3]；

5) 收发距可近至 1~2 倍勘探深度, 不受近场效应影响, 观测范围大[6];

6) 抗干扰能力强: 所有频点的发射电流均能达到最大总电流, 不需分流;

7) 分辨率高: 发射的频率可任意编辑, 不需像传统频率电磁法一样, 需要按 2 或 10 的对数分布, 基础频点达 100 以上, 通过谐波可单次发射几百个频点, 可针对目标体深度加密频点, 提高深部分辨能力[6];

8) 兼容多种传感器: 可使用多种传感器采集电性信息, 如 E_x/E_y 电道、H_z 磁道、B_z 线圈等方式, 可以仅选择一种采集方式即可反演电阻率或极化率, 适合用于不同探测目的和不同接地条件采集[3]。

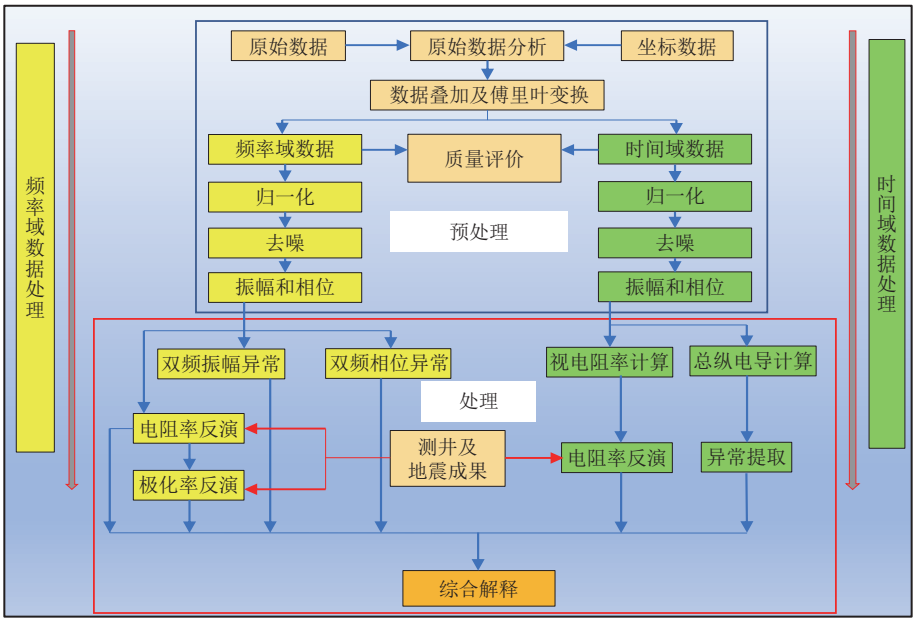


图 2　时频电磁数据处理流程示意

Fig. 2　Schematic of time-frequency electromagnetic data processing flow

2　时频电磁设备发展现状

2.1　俄罗斯时频电磁技术与设备研发

俄罗斯 KRUKO 公司从 1992 年开始研究建场法设备, 并于 1996 年生产出全球第一套时频电磁仪, 取名 AGE-xxl-4-h。2010 年 AGE-xxl-4-h 升级到第二代产品, 更名为 AGE-xxl-M, 通道数从 2 增加到 4, 并首次销售到我国中石油东方地球物理公司, 且开展了技术支持[4,10]。2016 年, AGE-xxl 升级到第三代产品, 更名为 AGE-xxl-MX, 通道数有 2、4、8、12、24 可选, 并通过恒达新创 (北京) 地球物理技术有限公司公司销往江苏华东八一四地球物理勘查有限公司。2022 年初, KRUKO 公司在四川拓创探测科技有限公司的定制要求下, 推出第四代 AGE-xxl-24MX 时频电磁系统, 并在我国出售了 10 余套。该系统整体性能均衡、成熟稳定, 可进行 TFEM、CSEM、TEM、FEM、LoTEM、ERT、BSEM、MT 等方法技术的数据采集和数据处理工作(见表 1、图 3)。

2.2　国内时频电磁技术与设备研发

2002 年东方地球物理公司何展翔教授在应用大功率建场测深法的基础上, 提出了 TFEM 的概念[5]。该方法提出之初是用时间域垂直磁场信号反演电阻率信息, 频率域电场信号提取极化率信息, 用电阻率和极化率信息对圈闭的含油气性进行评价。TFEM 在融合了 CSAMT 和 LOTEM 各自的优点基础上增大了发射功率和电流, 提高了分辨能力和勘探深度[4]。

2013 年, 中石油东方地球物理公司对购得的 AGE-xxl-M 时频电磁系统进行升级优化, 研发出国内第一套 TFEM-T 时频电磁系统, 通过增大发射机

表 1　第四代 AGE-xxl-24MX 时频电磁系统技术参数

Table 1　Technical parameters of the fourth generation AGE-xxl-24MX time frequency electromagnetic system

参数	数值
通道数量	2、4、6、8、12、24
最大功率/kW	75
最大电压/V	830
最大电流/A	150
发射频率范围/Hz	DC~20 000
采集频率范围/Hz	DC~4 000
兼容传感器	电道, 磁道, 线圈
处理软件	WLF 6.2
处理功能	TFEM、CSEM、TEM、FEM、LoTEM、ERT、BSEM



图 3 第四代 AGE-xxl-24MX 时频电磁系统

Fig. 3 Fourth generation AGE-xxl-24MX time-frequency electromagnetic system

功率和降低采集站成本，使得大道数采集得以实现，以满足深部油气勘探的需求[10]。这一阶段，TFEM-T 系列大功率发射机委托西安嘉盛宇航电科技有限责任公司生产；采集站和磁棒委托中国科学院电子学研究所参照俄罗斯的 AGE 系统的采集站和磁棒进行代工生产；处理软件使用中石油东方地球物理公司研发的 GeoGME 重、磁、电处理解释系统。目前，已经生产了大功率时频电磁发射系统 10 余套，形成了从 TFEM-1~TFEM-3 等多种型号，功率从 150~300 kW、输出电流从 80~200 A 等系列产品。时频电磁采集站包括模拟、组网式和节点式多种类型，可以适应不同探区地形地貌，总道数可达近 2 000 道[4,6,11-16]（见表 2）。

四川拓创探测科技有限公司联合俄罗斯的 KRUKO 公司，在第四代 AGE-xxl-24MX 时频电磁系统的基础上：①对采集站进行降噪升级；②将发射机功率提升到 200 kW；③升级了北斗通讯和同步系统；④拓展了三维激电（3DIP）、大地电磁（AMT+MT+BMT）、半航空电磁（SEMI-AERO EM）等采集测量功能；⑤研发出最新一代的 TFEM-TC 时频电磁系统。

表 2 国产 TFEM-TC 时频电磁系统技术参数

Table 2 Technical parameters of domestic TFEM-TC time frequency electromagnetic system

TFEM-T200发射机		TFEM-R5采集站	
数值	参数	数值	参数
最大发射功率/kW	200	一次性采集成果	ρ(TEM)、ρ(FEM)、η(f)
最大发射电流/A	150(每个频点均能达到总电流) 可发射高频大电流信号	通道数	2、4、5、6、8
最大输出电压/V	1 500	最高采样率/kHz	40
最大发射频率/kHz	20	ADC位数/位	32
单次发射频率数	30~128个频点可选，可任意编辑频点，谐波之后可达400个频点以上，且不需按2或10的对数分布	采集方式	TFEM、CSEM、TEM、FEM、LoTEM、ERT,BSEM、3DIP、AMT、MT、BMT、CSAMT、SEMI-AERO EM等
发射机控制器	控制发射频率及记录电压电流	频率范围/kHz	DC~20
发射波形	变频方波	通道噪声/μV	0.5
发射方式	任意占空比	传感器	电道、磁棒、线圈

近年来，TFEM-TC 时频电磁系统除了进行专业的时频电磁采集数据处理，也拓展了一些新的应用，比如半航空电磁、大地电磁、三维激电等应用方向的观测与数据处理,如：2025 年 3 月，四川省冶勘设计集团勘察设计有限公司利用 TFEM-TC 时频电磁系统开展了地—空频率域电磁测量，对地下电性结构进行了成像，效果显著（图 4）；2025 年 1 月，俄罗斯 KRUKO 公司使用 TFEM-TC 时频电磁系统在俄罗斯远东鞑靼斯坦进行三维激电测量，勘探深度突破 2 000 m（图 5）。

3 时频电磁系统的应用

3.1 油气探测

近 20 年来，非震物化探找油方法迅速发展，已成为油气勘探中不可忽视的力量[17]。大量研究表明，油气藏具有“环状三层楼”电性异常模式，为电磁法探测提供了理论基础[18-19]。TFEM 技术在油气勘探领域的系统性应用最早可以追溯到 20 世纪 90 年代的俄罗斯，该方法被用于直接探测油气目标，并显著提高了探井成功率[20]。我国则在 1999 年引进该技术，并在吉林、吐哈等油田开展试验，取得了良好效果[4]。目前，时频电磁技术在油气勘探方向的应用已经比较成熟；国家能源局已于 2013 年发布了石油天然气行业标准《时频电磁法勘探技术规程》（SY/T 6688—2013）；中华人民共和国国土资源部也于 2017 年发布了《页岩气地面时频电磁法技术规程》（DZ/T 0298—2017）。

3.1.1 应用现状

中石油东方地球物理公司作为国内最早开展这项工作的实施主体，已将该方法作为油气勘探开发中降低多解性风险的重要方法[11]。据不完全统计，

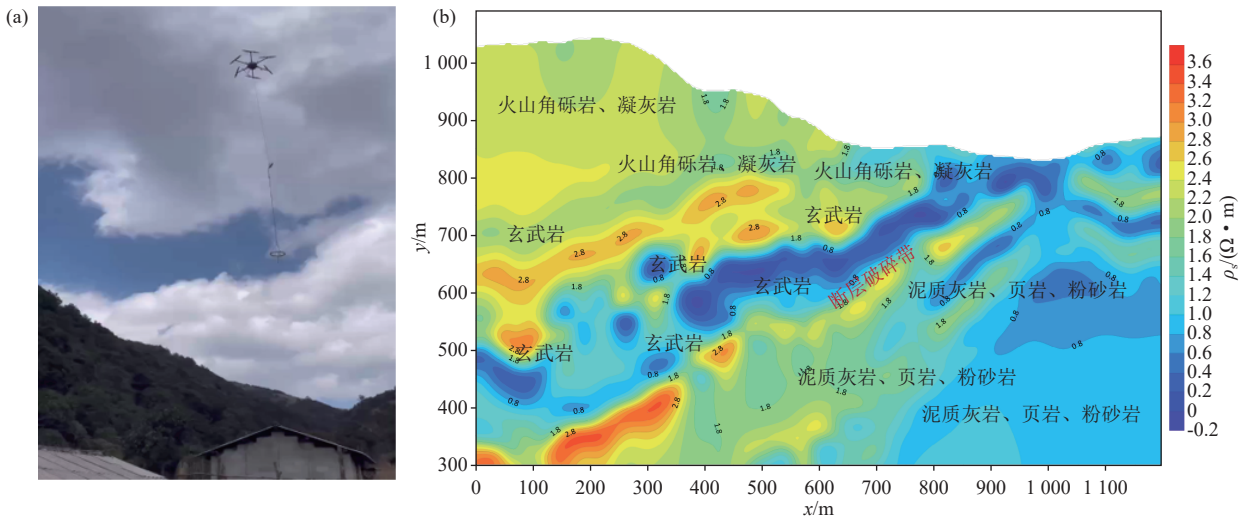


图 4　国产 TFEM-TC 时频电磁系统频率域半航空电磁观测(a)及处理成果(b)

Fig. 4　Observation (a) and processing results (b) of half aviation electromagnetic system in the frequency domain of domestic TFEM-TC time frequency electromagnetic system

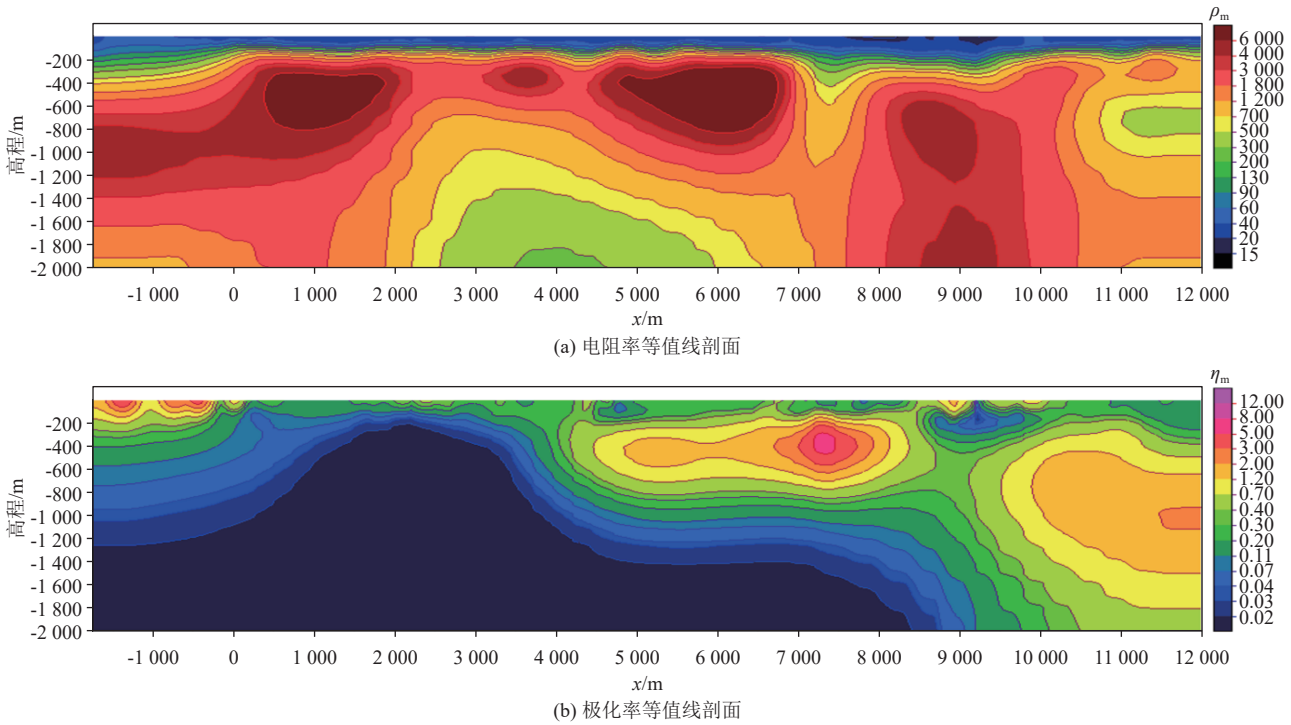


图 5　2025 年俄罗斯鞑靼斯坦 TFEM-TC 三维激电成像成果

Fig. 5　Three dimensional induced polarization treatment results of TFEM-TC in Tatarstan, Russia in 2025

截至 2023 年底, 中石油东方地球物理公司的时频电磁油气检测剖面长度已经达到 4.7 万 km, 在国内 120 多个目标区开展了应用, 同时在阿曼、乍得等 30 余个海外目标区进行了推广应用。

根据 60 余个碎屑岩砂泥岩油气藏目标应用统计, 时频电磁油气检测钻探成功率可达 75% 以上。例如, 在我国西部塔里木碳酸盐岩油气藏目标应用中, TFEM 部署的钻探成功率可达 70% 以上; 在塔里木 YM 地区根据 TFEM 部署并完钻井共计 28 口(在 TFEM 测线 500 m 范围内), 其中 19 口井与时频电磁预测结果吻合; 在西非地区, 已经钻探的 18 口探井产油气情况与 TFEM 匹配异常完全吻合, 而根据 TFEM 部署的探井 12 口, 其中 9 口获工业油流。

据国内外 556 口钻井储层极化率、电阻率的油气评价统计, TFEM 异常预测为含油目标的成功率在 78.5% 以上, 而预测为干井的成功率可达 80% 以上。另外, 目标深度较大的油气检测效果不如较浅目标, 深度小于 4 500 m, 油气检测成功率可大于

75%。随着目标深度加大，检测成功率降低；再就是强异常预测含油气和无异常预测不含油气的成功率可达 90% 以上，而中等或弱异常预测油气的成功率相对较低，含油又含水的目标预测成功率也相对较低。

2022 年，中国地质调查局油气资源调查中心在三门峡盆地使用进口的 AGE-xxl 时频电磁系统部署了测量工作，测线长度达 110 km，用以了解三门峡盆地重点地区地层发育情况、断裂特征以及构造带之间的接触关系，并开展了含油气性预测（图 6）。结合 TFEM 成果部署实施的豫峡 1 井钻探验证成功，实现了该区 50 年来油气调查工作的重大突破。不仅打破了“中原地区无油”的传统观念，也证明了中小型断陷盆地同样具备形成大油气田的条件，为全国 200 余个中小盆地提供了可复制、可推广的技术路径和理论依据，具有较强的引领示范作用[21]。

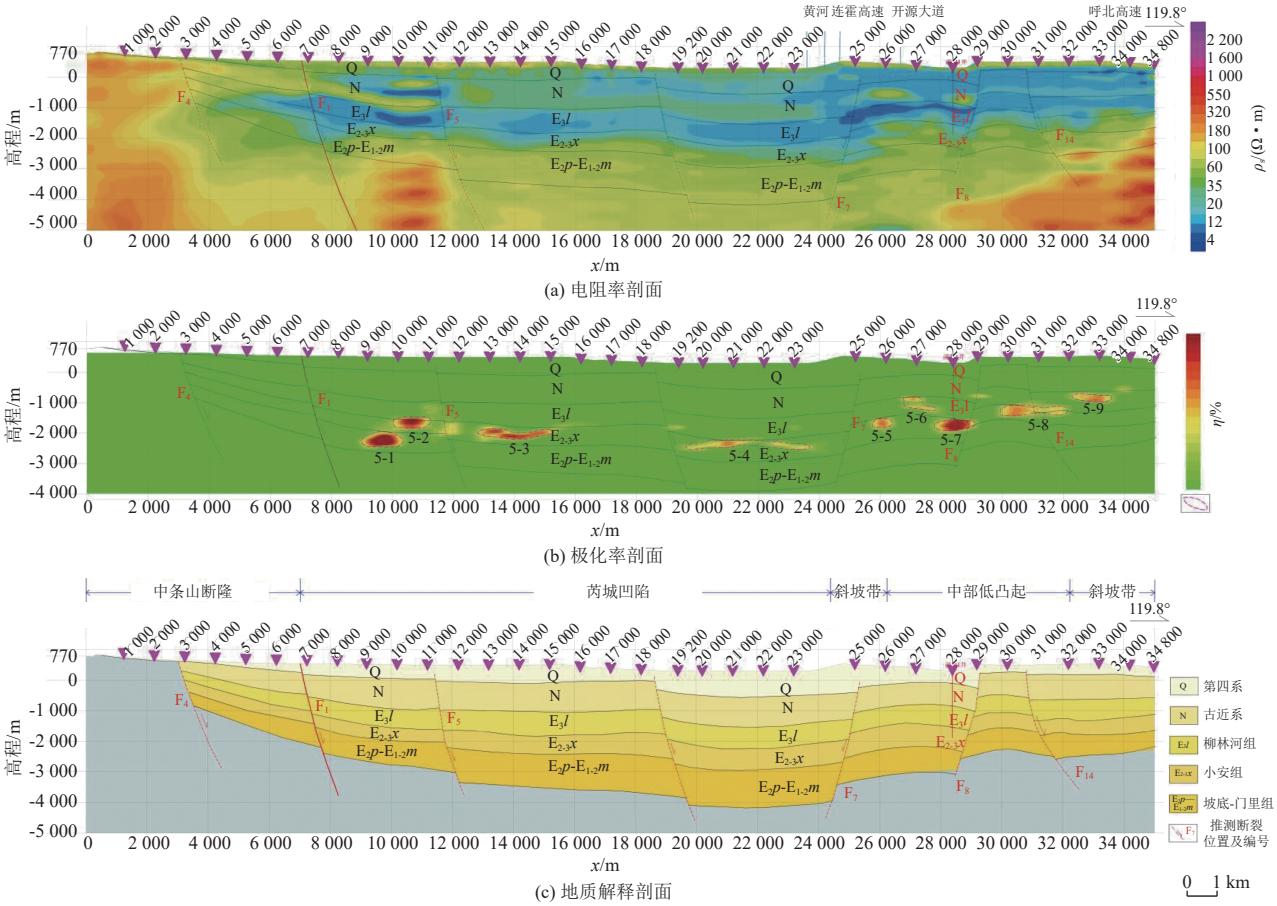


图 6　AGE-xxl 时频电磁系统三门峡油气资源调查成果剖面（钻孔位置揭露规模工业油流）

Fig. 6　Profile of AGE-xxl time-frequency electromagnetic system Sanmenxia oil and gas resource investigation results (drilling location reveals scale industrial oil flow)

3.1.2　数据处理技术发展现状与展望

基于油气电性异常的“环状三层楼”模式，TFEM 方法以油气藏本身为主要探测目标，而非传统电法研究的近地表异常[22]，并且采用多参数综合评价的手段进行油气识别。

早期，行业主要采用电阻率和极化率联合定性解释[8]，其中极化率既可以从频率域进行提取[23]，也可以从时间域进行提取[24]，但该手段不能给出含油气的定量评价。之后，发展了基于频域振幅、相位、时域视充电率以及反演获得的电阻率与极化率等多种参数进行相关分析与组合运算，最终提取出如含水因子、含油因子等更具指示意义的属性异常，显著增强了目标层的弱信息响应，例如幅相—极化率电阻率解释技术[25]、多属性图像融合技术[26] 和多参数深度学习智能油气评价技术[27]。另外，油气勘探中大量的地震勘探和钻井资料为约束反演与多种资料综合解释提供了可能。目前，已经发展了多分量联合反演技术[28] 和多种资料的约束反演[8, 29-30]，以更好地恢复目标体的形态。

在碳酸盐岩、火成岩、深部隐伏岩溶区等强非均质性地区，电磁响应复杂，多解性强，异常识别困难[27]。推动 TFEM 与地震、测井数据融合，构建“电—

震—井”联合约束反演框架, 是提升复杂地区深部薄层储层识别精度的重要手段。进一步的精细评价需要充分结合岩石物理性质的约束。这是因为一方面, 随着地层深度增加, 地层的温度、压力变化会对电阻率产生影响, 进而会给储层解释带来误差, 考虑温压关系的电磁反演结果更加符合“原位电阻率”模型; 另一方面, 针对油气藏的地电模型需要考虑电阻率—饱和度定量关系, 基于 Archie 公式等频散物理约束, 是实现时频电磁法由“异常识别”向“饱和度计算”跨越的关键[31]。

3.2　矿产勘查

当前矿产勘查面临目标探测深度大、在产矿山电磁干扰强、解释信息不足等问题。时频电磁系统采用超大功率人工源发射, 具有较大的探测深度和抗干扰能力。最重要的是, 该方法可同时获得电阻率和极化率参数, 在寻找硫化物矿床方面具有显著优势[3]。

3.2.1　应用现状

国内最早利用时频电磁法进行矿产勘查试验是在四川拉拉铜矿。2021 年, 四川省第七地质大队联合四川省第九地质大队在四川拉拉铜矿已知剖面使用 AGE-xxl 时频电磁系统开展方法试验。结果显示低阻高极化异常与钻孔资料基本吻合, 初步证明了极化率参数在矿产勘查中的有效性。同年, 云南中铜矿产资源有限公司联合江苏华东八一四地球物理勘查有限公司利用时频电磁和重力在云南滇东北毛坪超大型铅锌矿区探获厚 34.15 m、品位 29.97% 的铅锌矿体。2023 年, 云南黄金矿业集团股份有限公司勘查分公司基于时频电磁技术在云南香格里拉红牛铜钼多金属矿区的强干扰生产矿山的找矿勘查中取得了有效的勘探成果, 进一步证实了时频电磁技术的抗干扰能力。

从 2024 年开始, 时频电磁技术已在四川、云南、新疆、甘肃、贵州、河南等地的多个矿山勘查项目中取得大量应用成果[32-38]。例如: 2024 年, 云南冶金资源股份有限公司联合四川省第九地质大队在云南彝良铅锌矿勘查中利用极化率参数直接确定了矿体位置; 2024 年, 云南黄金矿业集团股份有限公司在保山白沙水金铜铁多金属矿区探获 80 m 厚磁铁矿体; 2025 年, 四川省第九地质大队联合西藏中凯矿业股份有限公司在西藏林周县帮中矿区探获较大钼钨矿化体; 2025 年, 四川省第九地质大队和新疆维吾尔自治区地质局地球物理化学探矿中心在甘肃肃北县马鬃山镇进行时频电磁勘探, 经初步钻孔验证, 钻获钨矿化体、萤石矿、黄铜矿化、黄铁矿化。同年, 中国地质调查局发展研究中心与云南省有色地质局在云南武定地区利用时频电磁法圈定的低阻高极化异常进行钻探验证, 在覆盖区下 611 m 揭露到平均品位 1.05%、厚 4.58 m 的铜矿体, 不仅开辟了滇中深部铜多金属矿勘查的新方向, 更为该技术方法提供了关键地质证据[39]。

可以看出, 时频电磁法在矿产勘查中已从早期的试验验证阶段迈入规模化应用阶段, 并在深部金属矿、复杂地形、强干扰环境中展现出强大潜力。

3.2.2　数据处理技术发展现状与展望

在数据处理方面, 该技术在矿产领域尚未形成统一、系统的技术规范。实际工作中普遍沿用油气探测的数据处理方法: 一方面, 通过计算频散率曲线对激电异常进行定性识别; 另一方面, 结合电阻率—极化率联合反演的结果对异常进行定量分析。

但与油气探测不同, 矿产勘查的目标地质体规模小、三维特征突出, 且往往缺乏钻孔、测井等约束信息, 导致直接套用油气处理方法可能出现假异常或漏矿。因此, 亟需建立针对金属矿的噪声压制、极化率体积反演、多参数融合与定量解释标准[3]。未来, 随着多源地球物理数据融合、智能预处理与反演、团体标准编制等工作的推进, TFEM 有望成为我国新一轮找矿突破战略行动中重要的勘查技术之一[31]。

3.3　地热勘查

地热资源作为清洁低碳的可再生能源, 已成为我国能源结构转型的重要组成部分, 其勘探核心目标是精准识别深部热储层(如岩溶型、裂隙型储层等)的空间分布、埋藏深度、含水性及控热构造特征。大量研究表明, 热储层与围岩存在显著的电性差异, 例如热储层呈低阻特征, 干热岩呈高阻特征, 控热断裂带表现为低阻连通条带等, 这为电磁法探测提供了核心理论基础。TFEM 技术在解决地热勘探“深部探测精度不足、热储层识别模糊、构造连通性判定困难”等关键问题上展现出一定优势。我国于 2010 年后逐步推广该技术。2025 年, 自然资源部发布了《地热地面时频电磁法规程》(DZ/T 0510—2025), 为行业应用提供了规范化指导。

3.3.1　应用现状

近年来, TFEM 技术已在我国多个地热资源开发区开展了规模化应用, 重点聚焦中深层岩溶型、裂隙型、干热岩型热储勘探。据不完全统计, TFEM 地热勘探已在华北平原、四川盆地、共和盆地等区域的 20 余个目标区开展了工作[39-43]。

2017 年以来, 中国地质调查局水文地质环境地

质调查中心在雄安新区、天津东丽湖等地深部雾迷山组热储勘探中，利用 TFEM 方法查明了地下 5~6 km 范围内的电性结构，并从热源、通道、储层、盖层、流体等方面提出了地热有利区，支撑了深部岩溶热储的精准定位[39-40]。2023 年 12 月，四川省第九地质大队也在四川省德阳市旌阳区双东镇使用了进口的 AGE 时频电磁系统进行地热勘查，处理成果与地质分层基本吻合，取得了较好的探测效果。2024 年 11 月，中石油深圳新能源研究院有限公司使用该方法在河北大厂城镇强干扰地区进行深部地热资源探测，基于 TFEM 结果布设两个钻孔，分别在 3 300 m 和 3 800 m 处见大量高温涌水，进一步证实了 TFEM 强抗干扰能力与深部探测效果。在金牛湖火山岩地区的地热资源勘查中，安徽省勘查技术院布设了 2 条 TFEM 剖面，采用“降维逼近”反演方法获得地下 5 km 范围内的电性模型，定位了深部断裂破碎带。基于 TFEM 结果确定的钻孔经后期抽水试验确定，日出水量达 500 m^3，钻井井口水温 51 ℃，提高了地质条件复杂地区地热勘查的成功率[42]。另外，在青海共和盆地干热岩探测中，中国地质调查局水文地质环境地质调查中心部署了 170 km 的 TFEM 测量工作，查明了盖层厚度和花岗岩基底的起伏形态，利用高阻特征在深部识别出了代表区域热流传导汇聚区的侵入岩岩基或岩株[42]。

从应用范围来看，TFEM 技术在地热勘探中的应用已从单一剖面测量逐步拓展至多剖面三维探测，从区域地热资源普查延伸至钻井靶点精细定位，但目前应用仍集中于华北平原等中东部地区，在西部高海拔、强构造活动区的应用案例相对有限，技术适应性仍需进一步验证[43]。

3.3.2 数据处理技术发展现状与展望

在数据预处理方面，地热勘查大多位于城镇地区，人文干扰严重。Zhang 等[44] 针对野外观测中的 50 Hz 工频噪声、高频随机噪声等提出组合滤波方式，提高了 TFEM 在人文噪声复杂地区的抗干扰能力。在数据反演与解释方面，地热领域现阶段大多采用电阻率参数直接反映介质的含水性，或者采用电阻率拟地震成像技术定位地层分界面[29]。根据岩石物性统计结果，极化率与岩石的渗透率正相关，裂隙充填流体时极化率显著高于致密围岩，即利用极化率参数可以辅助识别裂隙型热储层[45]。可见，TFEM 在地热勘探中的应用也属于起步阶段，部分有用信号未能完全发挥作用。另外，受限于体积勘探效应，在精细刻画地层、断裂构造、局部异常或细小裂隙方面存在不足，特别是温度与电阻率的定量关系，仍需要进一步的研究。

4 结论

面对当前日益严峻的国际形势，国家对能源资源勘探以及工程勘查的探测需求日益加重，其中矿产资源、油气资源、地热资源、页岩气资源以及工程勘查对地球物理探测的要求越来越高，传统电磁法勘探深度有限、参数单一、抗干扰能力不足，难以满足当前勘探需求，时频电磁法因其同时具备大深度、高信噪比、高抗干扰能力、高分辨率、多参数等优点，可以满足当前的探测需求。当前时频电磁系统已经在矿产勘查、油气资源调查、地热资源调查中取得良好的探测效果，我们应加大对时频电磁系统的关注和重视，鼓励和支持时频电磁技术的发展和应用创新，使其发挥出更大的作用。

尽管时频电磁法已经在矿产勘查、油气资源调查、地热资源调查中取得良好的探测效果，但针对当前地球物理勘探的复杂应用场景、更高的探测效率需求以及实时动态的观测需求，笔者认为时频电磁技术还需要在以下几个方面进行拓展：

1) 地—空电磁方向的应用拓展：近年来地—空电磁技术取得了突破性的进展以及大面积的应用，但当前受限于发射功率有限，勘探深度不大；此外，由于采集硬件性能的限制，数据质量不够高，成果分辨率有限，限制了航空—半航空电磁技术的应用与发展。而时频电磁系统最大的优势是超大的发射功率以及更高的数据质量，当前已有四川省第九地质大队使用时频电磁系统进行地面发射，空中采集站进行数据采集，并进行半航空频率域电磁数据处理，相对于现有的低空电磁系统，有效的勘探深度更大、分辨率更高，已经获得了良好的实验效果；时频电磁系统可以任意编辑发射频率和波形，可进行大功率地—空瞬变和地—空频率电磁的发射，因此可推断时频电磁技术将会在地—空电磁方向取得快速进展。

2) 地井—井地电磁方向的应用拓展：地井—井地电磁因其具有可抵近观测目标体的优势，近年来随着技术迅速发展，时频电磁技术因其灵活的收发装置，以及可以正演的数据处理系统，既可以满足井中发射、地面采集的电磁勘探方法，也可以实现地面发射、井中探头进行采集的数据采集方式。因此可推断时频电磁系统会在地井—井地电磁勘探中取得快速的应用和发展。

3) 三维时频电磁勘探与四维电磁监测拓展：时频电磁系统可在采集测点足够多的情况下进行三维

数据正、反演，目前国内中石油深圳新能源研究院已经开始这方面的尝试，同时，时频电磁技术也可在一次发射过程中，使用足够多的采集通道进行同时采集，从而实现真三维的数据采集，如果能够结合当前高速的 4G/5G 通信技术，就能够将观测数据进行实时回传，远程对时频电磁系统数据进行动态观测采集，获得四维动态电磁监测，这种监测技术将会对页岩气、煤层气等压裂过程的监控与分析提供更加有力的支持。

参考文献（References）：

[1] 何继善. 大深度高精度广域电磁勘探理论与技术 [J]. 中国有色金属学报, 2019, 29(9): 1809−1816.
He J S. Theory and technology of wide field electromagnetic method[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2019, 29(9): 1809−1816.

[2] 底青云, 朱日祥, 薛国强, 等. 我国深地资源电磁探测新技术研究进展 [J]. 地球物理学报, 2019, 62(6): 2128−2138.
Di Q Y, Zhu R X, Xue G Q, et al. New development of the electromagnetic(EM) methods for deep exploration[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2019, 62(6): 2128−2138.

[3] 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. High-power-ultrahigh-power electromagnetic exploration technology: Progress and outlook[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(4): 755−767.

[4] 何展翔, 董卫斌, 刘雪军, 等. 时频电磁 (TFEM) 法: 回顾与展望 [J]. 石油地球物理勘探, 2025a, 60(5): 1326−1340.
He Z X, Dong W B, Liu X J, et al. Overview of time-frequency electromagnetic exploration technology[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2025a, 60(5): 1326−1340.

[5] 何展翔, 王绪本, 孔繁恕, 等. 时—频电磁测深法 [C]//中国地球物理学会第十八届年会论文集, 2002.
He Z X, Wang X B, Kong F S, et al. Time-frequency electromagnetic sounding method[C]//Proceedings of the 18th Annual Conference of Chinese Geophysical Society, 2002.

[6] 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, 2020a, 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, 2020a, 55 (5): 1131-1138, 937.

[7] 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.

[8] 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, 2020b, 55(4): 898−905,705.
He Z X, Hu Z Z, Wang Z G, et al. Time-frequency electromagnetic (TFEM) technique: Step-by-step constraint inversion based on artificial fishswarm algorithm[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020b, 55(4): 898−905,705.

[9] 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-firequency electromagnetic (TFEM) method: Data acquisition design[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2019, 54(4): 908−914, 727.

[10] 何展翔, 吴迪, 吴磊. 我国大功率可控源电磁仪器的现状与发展方向 [J]. 物探装备, 2012, 22(6): 351−355.
He Z X, Wu D, Wu L. The current situation and developing trend of domestic large power contro source electromagnetic instrument[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2012, 22(6): 351−355.

[11] 何展翔, 陈涛, 陈本池, 等. 时频电磁 (TFEM) 技术——油气检测原理与方法 [J]. 石油地球物理勘探, 2025, 60(4): 1032−1045.
He Z X, Chen T, Chen B C, et al. Time-frequency electromagnetic techniques: Hydrocarbon detection principle and methods[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2025, 60(4): 1032−1045.

[12] Wang J L, Lin P R, Wang M, et al. Three-dimensional tomography using high-power induced polarization with the similar central gradient array[J]. Applied geophysics, 2017, 14(2) : 291-300.

[13] Wang J L, Lin P R, Wang M, et al. A multiple parameter extraction and electromagnetic coupling correction technique for time domain induced polarisation full waveform data[J]. Exploration Geophysics, 2019, 50(2): 113−123.

[14] Wang M, Wang J, Lin P, et al. Three-Dimensional Resistivity and Chargeability Tomography with Expanding Gradient and Pole-Dipole Arrays in a Polymetallic Mine, China[J]. Remote Sensing. 2024, 16, 186.

[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. Advances of TFEM technique and its application[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2016, 51(S1): 144−151,11.

[16] 穆群英, 魏启, 庞恒昌, 等. TFEM 组网式时频电磁采集系统组成及功能 [J]. 物探装备, 2017, 27(1): 67−70.
Mu Q Y, Wei Q, Pang H C, et al. System composition and functions of the TFEM network time frequency electromagnetic acquisition system[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2017, 27(1): 67−70.

[17] 王珺璐, 冯兵, 杨万军, 等. 非震物化探找油方法优选组合研究———以鄂尔多斯盆地为例 [J]. 物探与化探, 2014, 38(6): 1159−1163.
Wang J L, Feng B, Yang W J, et al. The optimized combination of non-seismic geophysical and geochemical exploration methods in the prospecting for oil: A case study of Ordos Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(6): 1159−1163.

[18] 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 electromagnetic survey[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(1): 102−106.

[19] 王珺璐, 贺永红, 王萌, 等. 层次分析和特征值分析相结合的物化探综合油气评价 [J]. 物探与化探, 2015, 39(4): 762−767.
Wang J L, He Y H, Wang M, et al. The comprehensive evaluation of oil and gas exploration combining hierarchy analysis and eigenvalue analysis[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(4): 762−767.

[20] 赵邦六, 何展翔, 文百红. 非地震直接油气检测技术及其勘探实

践 [J]. 中国石油勘探, 2005, 10(6): 29−37.
Zhao B L, He Z X, Wen B H. Non-seismic technique for direct oil-gas detection and its exploration practice[J]. China Petroleum Exploration, 2005, 10(6): 29−37.

[21] 张交东, 周新桂, 杨超, 等. 三门峡盆地地质矿产勘查历程和油气发现启示 [J]. 中国地质调查, 2025, 12(1): 1−16.
Zhang J D, Zhou X G, Yang C, et al. Exploration history of geological mineral resources in Sanmenxia basin and implications from oil and gas discovery[J]. Geological Survey of China, 2025, 12(1): 1−16.

[22] 马勇胜, 张春贺, 田玉昆, 等. 地震约束下时频电磁法识别富有机质页岩层系研究 [J]. 地球物理学进展, 2016, 31(6): 2618−2626.
Ma Y S, Zhang C H, Tian Y K, et al. Research on identification of organic-rich shales using seismic constrained time-frequency electromagnetic method[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(6): 2618−2626.

[23] 孙志华, 付吉林, 杨书江, 等. 时频电磁法勘探在尼日尔 A 区块的应用效果 [J]. 石油地球物理勘探, 2012, 47(S1): 147−151, 169−170, 162.
Sun Z H, Fu J L, Yang S J, et al. TFEM applications in the block A, Niger[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2012, 47(S1): 147−151, 169−170, 162.

[24] 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): 1227−1232,1053−1054.
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): 1227−1232,1053−1054.

[25] 陈德炙, 宋伟聪, 李德春, 等. 幅相—极化率电阻率解释系统在时频电磁法中的应用研究 [J]. 工程地球物理学报, 2018, 15(3): 364−370.
Chen D Z, Song W C, Li D C, et al. The application of AP-IPR interpretation system to time and frequency electric method[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2018, 15(3): 364−370.

[26] 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.

[27] 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. Advances and applications of time-frequency electromagnetic methods in oil and gas detection[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2023, 33(6): 351−353.

[28] 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): 452−458,248-249.
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): 452−458,248-249.

[29] 周印明, 刘雪军, 张春贺, 等. 快速识别页岩气“甜点”目标的时频电磁勘探技术及应用 [J]. 物探与化探, 2015, 39(1): 60−63,83.
Zhou Y M, Liu X J, Zhang C H, et al. The TEEM technology for quick identification of "sweet spot" of shale gas and its applications[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(1): 60−63,83.

[30] 袁崑铭, 魏巍, 葛大壮, 等. 时频电磁法在喀什凹陷北缘深部地质结构以及油气探测中的应用 [J]. 物探化探计算技术, 2025, 47(5): 695−706.
Yuan K M, Wei W, Ge D Z, et al. The application of the time-frequency electromagnetic method in the exploration of deep geological structures and oil and gas detection at the northern margin of the Kashgar Depression[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 47(5): 695−706.

[31] 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.

[32] 周听全, 李旭俊, 王瑞, 等. 西南三江造山带核桃坪铅锌多金属矿集区探寻隐伏矿取得新突破 [J]. 矿床地质, 2025, 44(5): 1143−1148.
Zhou T Q, Li X J, Wang R, et al. New exploration breakthrough of concealed ore in Hetaoping Pb-Zn polymetallic mining cluster from Sanjiang Orogenic Belt, Southwest China[J]. Mineral Deposits, 2025, 44(5): 1143−1148.

[33] 李晓红, 李祖义, 左鑫灿, 等. 时频电磁法 (TFEM) 在云南省景谷某大型铜矿床的初步应用 [J]. 矿产勘查, 2025, 16(S1): 172−180.
Li X H, Li Z Y, Zuo X C, et al. The preliminary application of time-frequency electromagnetic method(TFEM) in a large copper deposit in Jinggu, Yunnan Province[J]. Mineral Exploration, 2025, 16(S1): 172−180.

[34] 李陇锋, 乔得福, 路瀚, 等. 综合物探三维建模在甘肃岷县三沟金矿区深部成矿预测中的应用 [J]. 中国锰业, 2025, 43(2): 56−66.
Li L F, Qiao D F, Lu H, et al. Application of integrated 3-D geophysical modelling to deep-seated mineral prediction in the Sangou gold district, Min County, Gansu Province[J]. China’s Manganese Industry, 2025, 43(2): 56−66.

[35] 杨昌华, 肖章程, 姜永果, 等. 滇西南景谷地区铜矿床地质特征与有效勘查技术组合: 以曾家村铜矿为例 [J]. 矿产勘查, 2025, 16(8): 1855−1869.
Yang C H, Xiao Z C, Jiang Y G, et al. Geological characteristics and effective exploration techniques combination of Cu deposits in Jinggu area, Southwestern Yunnan Province: A case study of the Zengjiacun Cu deposit[J]. Mineral Exploration, 2025, 16(8): 1855−1869.

[36] 陶兴雄, 廖兴国, 顾雄, 等. 滇西北香格里拉红牛铜矿床勘查突破及其区域找矿意义 [J]. 地质找矿论丛, 2025, 40(3): 316−324.
Tao X X, Liao X G, Gu X, et al. Breakthrough and exploration significance of Hongniu copper mine in Shangri-La City, northwest Yunnan Province[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2025, 40(3): 316−324.

[37] 于扬, 王登红, 刘善宝, 等. 四川省牦牛坪矿床外围隐伏稀土矿体第二阶段找矿突破及启示 [J]. 中国地质调查, 2024, 11(6): 8−14.
Yu Y, Wang D H, Liu S B, et al. Second -phase prospecting breakthrough and revelation of hidden rare earth orebody in peripheral Maoniuping deposit of Sichuan Province[J]. Geological Survey of China, 2024, 11(6): 8−14.

[38] 王礼兵, 陈辉, 李宏坤, 等. 滇中武定—禄丰覆盖区铜矿找矿取得新突破 [J]. 矿产勘查, 2025, 16(9): 2218−2221.

Wang L B, Chen H, Li H K, et al. New achieved in copper prospecting in the covered area of Wuding-Lufeng, central Yunnan[J]. Mineral Exploration, 2025, 16(9): 2218−2221.

[39] 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. Research on time-frequency electromagnetic method detection of deep karst thermal reservoir and prediction of favorable area in Dongli Lake of Tianjin[J]. North China Geology, 2023, 46(2): 1−8.

[40] 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 Xiong'an New Area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(6): 1400−1409.

[41] 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.

[42] 程正璞, 魏强, 连晟, 等. 青海共和盆地恰卜恰深部花岗岩热储时频电磁法探测及干热岩体预测 [J]. 中国地质, 2025, 52(2): 438−451.
Cheng Z P, Wei Q, Lian S, et al. Deep-seated granite thermal reservoir exploration and hot dry rock potential assessment in the Qiabuqia area, Gonghe Basin, Qinghai: A time-frequency electromagnetic method approach[J]. Geology in China, 2025, 52(2): 438−451.

[43] 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, 2023, 45(3): 250−257.
Zhu Y S, Lei D, Li Y L, et al. Application effect of high-power time-frequency electromagnetic method in hot-dry-rock exploration in northern Hainan region[J]. Geology of Chemical Minerals, 2023, 45(3): 250−257.

[44] Zhang B M, Dai S K, Jiang Q Y, et al. Time-domain denoising of time–frequency electromagnetic data[J]. Applied Geophysics, 2019, 16(3): 378−393.

[45] 孙仁斌, 楚丽霞, 王宁, 等. 时间域激电测深二维反演在内蒙古兴和盆地贫水区找水勘查中若干案例研究 [J]. 地球物理学进展, 2017, 32(1): 387−394.
Sun R B, Chu L X, Wang N, et al. 2D inversion of IP-resistivity sounding in water exploration of Xinghe Basin in Inner Mongolia [J]. Progress in Geophysics, 2017, 32(1): 387−394.

Overview of time-requency electromagnetic techniques research: Technology, equipment and applications

LUO Xian-Zhong[1, 2], HE Zhan-Xiang[3], XU Xue-Gui[4], XIE Tao[4], JIANG Da-Jun[5], CHEN Hui[1, 2]

(1. *Development and Research Center*, *China Geological Survey*, *Beijing* 100037, *China*; 2. *Mineral Exploration Technical Guidence Center*, *Ministry of Natural Resources*, *Beijing* 100037,*China*; 3. *Department of Earth and Space Sciences*, *Southern Univeresity of Science and Technology*, *Shenzhen* 518055, *China*; 4. *No.9 Geological Team*, *Sichuan Province*, *Deyang* 618000, *China*; 5. *Sichuan Tuochuang Detection Technology Co.*, *Ltd.*, *Chengdu* 610045, *China*)

Abstract: The time-frequency electromagnetic method (TFEM) represents an artificial-source electromagnetic survey technology developed by integrating the advantages of both the frequency-domain controlled-source electromagnetic (FD-CSEM) method and the transient electromagnetic (TEM) method. This technology enables simultaneous acquisition of time-domain and frequency-domain electromagnetic responses with a single excitation. It is characterized by large exploration depths, multi-parameter inversion, high signal-to-noise ratio, and strong anti-interference capability, providing technical support for the fine characterization of subsurface structures. This study presents a systematic review of the TEFM, covering its core technical architecture and the equipment development roadmaps in China and abroad, with a particular emphasis on the analysis of the theoretical models, application status, and technical bottlenecks of the TFEM in three major fields, i.e., hydrocarbon exploration, mineral exploration, and geothermal resource surveys. The results of this study indicate that the TFEM effectively overcomes the limitations of traditional electromagnetic methods in exploration depth and parameter dimensionality, thus fully satisfying the high-precision and large-depth requirements of current energy resource exploration. However, its application in mineral and geothermal fields is in a critical stage of large-scale expansion, with its potential yet to be fully tapped. In the future, the TFEM technology will be expanded into fields such as ground-air collaborative detection and 3D/4D time-lapse monitoring, accompanied by constant innovations in multi-physics coupling and intelligent inversion algorithms. These advances will provide new impetus for its industrial application and technological upgrade.

Key words: time-frequency electromagnetic method (TREM); mineral resources; geothermal resource; petroleum and natural gas; fracture detection; 3D inversion; forward modeling

（本文编辑: 王萌）