

运用地电法进行干热岩地热能分析

刘瑞杨*

淄博职业技术大学, 新能源与电气工程学院 山东淄博

【摘要】本文围绕干热岩地热系统“源-储-盖”耦合地质特征开展梳理, 剖析铀、钍、钾等放射性产热元素对地表大地热流的贡献机制, 同时探讨氘、氧-18、硼、锂稳定同位素追踪地下热流体运移路径的原理。对比大地电磁法(MT, 探测深度 1-300 km)、音频大地电磁法(AMT, 探测深度 50 m-3 km)以及可控源音频大地电磁法(CSAMT, 探测深度 50 m-3 km)三类地电勘探手段, 从探测分辨率、抗干扰性能与施工经济成本多角度展开对比。研究结果表明, 在 3 km 以浅中等深度热储勘查工作当中, CSAMT 方法可以兼顾采集信噪比与野外作业效率。结合苏北盆地、共和盆地已获取的 CSAMT 电阻率反演剖面成果, 判定山东胶东中生代花岗岩分布带具备开发潜力; 该区域大地热流高于 70 mW/m², 隔热盖层厚度处于 2.5-3.5 km 区间, 可作为干热岩优先勘探靶区。

【关键词】干热岩; CSAMT; 放射性生热率; 大地热流; 增强型地热系统; 同位素示踪

【收稿日期】2026 年 7 月 12 日 **【出刊日期】**2026 年 8 月 28 日 **【DOI】**10.12208/j.jesr.20260001

Using geo-electricity methods to analysis the dry hot rock geothermal energy

Ruiyang Liu*

Zibo Polytechnic University, College of New Energy and Electrical Engineering, Zibo, Shandong

【Abstract】In this paper, the “source-reservoir-cap” combination characteristics of hot dry rock summarized systematically, and the contribution of radioactive heat-generating elements (U, Th, K) to terrestrial heat flow and the mechanism of stable isotope (D, ¹⁸O, B, Li) tracing thermal fluid migration are analyzed. The resolution, anti-noise ability and cost difference of MT (detection depth of 1-300 km), AMT (50 m-3 km) and CSAMT (50 m-3 km) geoelectric methods in deep thermal reservoir identification are compared. The results show that CSAMT has development potential at medium depth (70 mW/m²) and caprock thickness of about 2.5-3.5 km.

【Keywords】Dry hot rock; CSAMT; Radioactive heat generation rate; Earth heat flow; Enhanced geothermal system; Isotopic tracing

引言

地热能开发对于推进生态文明建设具备重要现实价值。经过数十年勘探开发, 国内浅层高温地热资源已经基本完成勘查评价工作^[1]。现阶段地热勘探普遍面临热储埋藏深度大、储层温度偏低、勘探技术手段单一等现实难题, 勘查实施难度显著提升。想要突破上述局限、提升地热勘探工作效率, 需要引入探测深度大、技术体系丰富的地球物理勘探手段开展探测工作^[1]。本文重点分析地电法在干热岩地热勘探中的应用。伴随社会发展, 生态环境保护要求持续提升, 作为一类清洁能源, 干热岩地热资

源契合当前能源发展需求。国内干热岩相关研究整体仍处于起步阶段, 但业内对该类资源的开发前景普遍看好。本文依托现有文献资料, 梳理干热岩石学基本特征, 筛选适配的物探勘查手段, 为国内地热资源开发提供参考依据。

全球首个干热岩工程为美国芬顿山试验项目, 该项目于 1970 年提出实施方案, 1973 年正式启动增强型地热系统现场试验。场地坐落于北美板块中元古代增生造山带, 临近北美西部盆岭省中新代火山岩体裂谷地带, 区域整体受张性应力场控制; 选址依托区域高热流条件与大型断裂构造, 分别为

*通讯作者: 刘瑞杨

资源提供热源条件与岩体赋存空间^[2]。我国干热岩资源分布范围广阔,青藏高原、松辽盆地、渤海湾盆地以及东南沿海均存在潜力区域^[3-5]。

近年来,干热岩开采技术也不断加强。干热岩压裂技术攻关方向有干热岩高温岩石力学及地应力特征、热应力作用下缝网形成机制研究,耐超高温分段、分层压裂工具研制^[6],高温硬地层体积压裂设计与软件开发,裂缝长期实时监测技术研究。压裂技术是向岩石注水,使之产生微裂缝。进而使岩石换热面积加大,有助于岩体转化成可开发的资源^[7]。从能源成本角度,干热岩发电成本仅为风电的二分之一,约为光伏发电的十分之一。2019 年前沿资源勘查结果表明,山东日照莒县、五莲县与威海文登区域具备干热岩资源富集条件,其折合标准煤资源规模可达 187.79 亿吨以上。全球陆域干热岩资源折算为标准煤约 4950 万亿吨,约为全球煤炭、石油与天然气总储量的 30 倍^[3-4]。我国大陆地下 3-10 km 深度范围内,干热岩资源当量约 856 万亿吨

标准煤,约占全球总资源量的六分之一,具备发展成为战略接替能源的潜力。

1 干热岩概况

1.1 定义

干热岩 (Hot Dry Rock, HDR) 是埋深较浅、温度较高、有较高经济开发价值的热岩体,内部不存在流体或仅有少量地下流体的高温岩体。它埋藏于距地表 3-10 km,岩体温度范围在 200-650 °C^[8]。主要是变质岩或结晶类岩体,常见的有黑云母片麻岩、花岗岩、花岗岩闪长岩^[9]。绝大部分为中生代以来的中酸性侵入岩 (图 1),还有可能是巨厚的块状沉积岩。干热岩资源储量极为丰富,比天然气、石油、煤炭转化的热能总和还要大。干热岩的开发形成规模是就称作增强型地热资源 (Enhanced Geothermal Resources),也称工程地热系统^[10]:利用工程技术手段开采干热岩地热能或强化开采低孔渗性热储地热能而建造的人工地热系统。我国的酸性岩分布较为分散,主要集中在华南和东北地区。

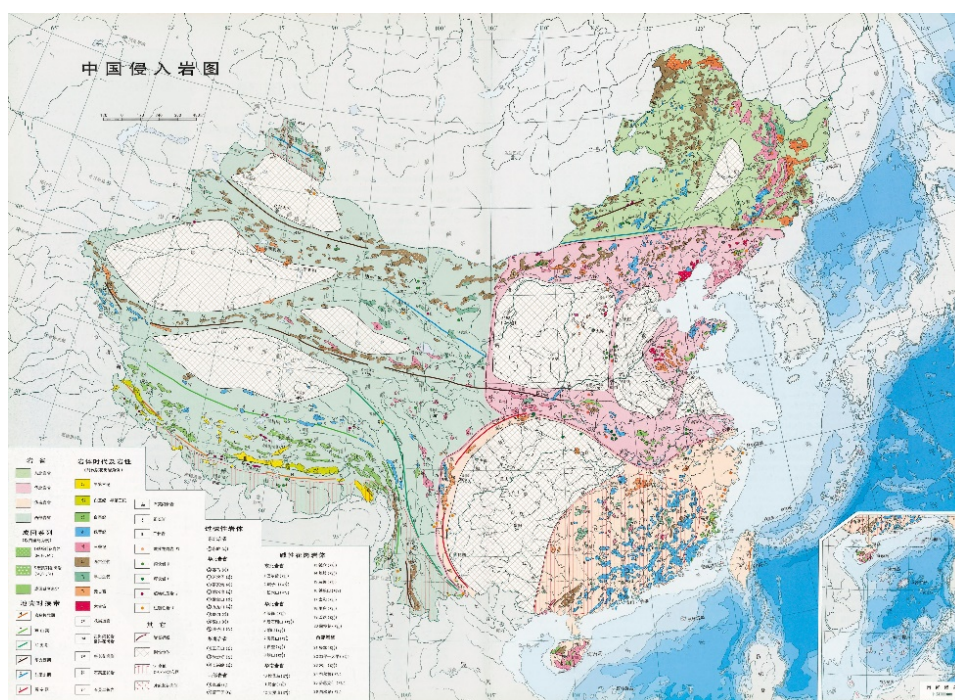


图 1 中国侵入岩图

1.2 形成条件和机理

根据笔者的文献调研,干热岩的形成机理主要问题涉及以下几个方面。首先是热源,大部分来自大地热流。热流作为地球内部热状态在地表最为直观的指标,是由地壳岩石中放射性生热元素 (U、Th、

K) 衰变产生热量 (地壳热流) 和地幔热流两部分组成 (图 2)。大陆地热流体研究应高度重视 Li-B-Sr-U 多种同位素方法的应用,同时也应结合不同温度条件下的水岩反应实验研究。U、Th、K 等半衰期与地球年龄相仿的放射性同位素,这些元素在衰变过

程中会产生大量的热,构成地球内热的主要热源^[1]。东营市在调查地热资源调查中,从以下三个方面总结了干热岩相关问题。热源方面:研究区莫霍面埋深处于 33-34 km,地壳深部热量借助断裂疏导、热传导以及地下水深循环对流等过程向热储层运移,大地热流构成区域地热的主要热源;区内岩浆热场多归属于岩浆余热型热源^[11]。热储层包含古近系东营组与新近系馆陶组两套。古近系东营组属于层状裂隙型热储含水层,在研究区内广泛展布。盖层由明化镇组与馆陶组地层共同构成,岩性以黏性土为主,结构致密,导热能力弱,隔热阻热效果优异,是地热系统优质盖层;该套地层属于不透水-弱透水岩层,能够实现隔水与隔热封闭效能^[11]。

1.3 同位素方法应用在干热岩研究

同位素在干热岩中的应用广泛。传统稳定同位素和放射性同位素均可以丰富本研究。张宏飞通过

锆石 U-Pb、LA-LCP-MS 年代学手段对区内黑马河岩体和温泉岩体进行定年研究,指出共和盆地周边花岗岩年龄为 218-235 Ma (印支期),并基于主微量元素和 Pb-Sr-Nd 同位素地球化学研究指出花岗质岩石的原岩来自下地壳的变玄武岩类^[12]。同位素示踪:硼稳定同位素常被用于示踪地热系统内硼的物源来源,判别热水与围岩相互作用^[13]。硼同位素被广泛应用于判别壳-幔演化和板块俯冲作用过程、海陆沉积环境、矿床成因和成矿物质来源等领域^[3]。在大陆地热体系中, Li 主要用于储层温度的估算、Li 物质来源研究、示踪热流体与围岩间的水岩反应过程、揭示热流体的运移和循环机制^[14-16]。地热流体的径流特征、热储温度等特征,采用稳定同位素 (D、¹⁸O) 的组成变化判别地热流体的来源及补给源,采用化学温标计算循环深度,判断热储温度,地热重点开采层位流体资源进行综合研究^[1,16,17]。

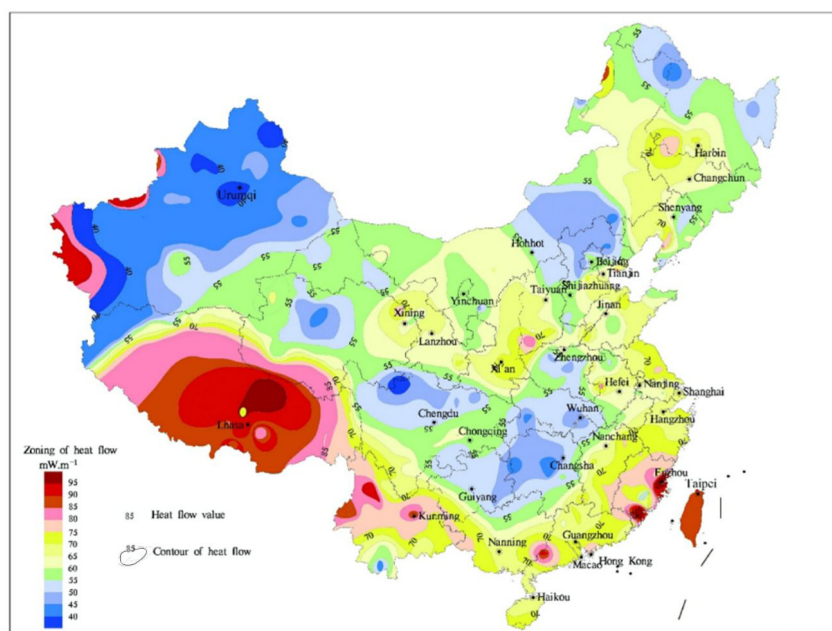


图 2 中国大地热流梯度分布图

2 研究方法

传统直流电阻率法原理简单,仪器操作便捷,在浅部地层探测当中灵敏度较高,适合开展大面积普查;但容易受高阻地层屏蔽,难以实现大深度探测,在深部地热项目当中局限性明显。电磁类物探手段不受高阻岩层屏蔽影响,探测深度大,探测精度高,更适合深部地热调查。电法是地热勘探中常

用的一种测量地面电阻率分布的方法,从地面电阻率分布可以得到构造和地层信息。基本原理:感应电流进入地球,从而产生电磁信号,并在地表进行监测^[1,8]。地热资源地球物理勘探以测量地球物理属性为手段,重点关注对岩石温度及流体比较敏感的地球物理参数:温度、孔隙度、渗透率、流体盐度以及压力^[1,8]。上述多项指标可实现对地热系统的表征。

但其中大部分参数难以通过地面传统地球物理手段直接获取,因此本研究筛选出适用性强、应用广泛且探测效果优异的物探手段,即大地电磁法(MT)、音频大地电磁法(AMT)与可控源音频大地电磁法(CSAMT)开展地热勘探工作^[18]。

2.1 地热地球物理勘探方法分类

分类标准:根据功率的类型,地电方法可分为两大类^[18]。第一类称为主动方法,被细分为通过交流电或直流电进入地面的方法,以及使用感应现象的方法。第二种被称为被动的方是是使用天然电磁场作为地面的能量来源^[18]。

2.1.1 主动法和被动法

地电法可以分为主动源测量法和被动源测量法。主动测量法可以分为:斯伦贝谢排列(Schlumberger)、温纳排列(Wenner array)、偶极-偶极阵列、双极-偶极阵列^[17]。被动源测量法可以分为:电磁法(MT)、音频大地电磁法(AMT)、主动源法(TEM)、可控源电磁法(CSEM)、可控源大地电磁法(CSAMT)^[10]。斯伦贝谢测深法被广泛使用了很长时间,至今仍是最流行的一种^[19]。电极在一条线上,装置围绕中心反射。这对电位电极靠近中心,而另一对电流电极逐渐远离中心,以便电流探测到更深的地球。偶极测深或剖面分析;有各种各样的阵列,其中许多在70年代到80年代被广泛使用^[19]。是基于研究音频范围内接地偶极子电流传输所产生的电磁场。温纳法是将电极等间距排列在直线上,距离为1,通过逐级递增改变电极间距a来实现深度探测。偶极测深和剖面分析,在70年代到80年代被广泛使用。基于研究音频范围内接地偶极子电流传输所产生的电磁场。电法剖面由两个三极装置组合而成^[20],在勘探过程中能够提供丰富地质信息,与其他传统的勘探方法相比较联合剖面法还具有分辨力强的特点。

2.1.2 直接法和间接法

直接勘探方法用于识别近水平地层空间分布,通过不断加大电极距,观测垂向视电阻率变化,以此解析地下地层垂向特征;包含地电法、热梯度、遥感、伽马射线探测等技术^[18],本文重点研究地电手段,依靠电阻率差异评估地热潜力、圈定热源范围。可依据不同探测手段获取的区域电阻率差异特征,开展地热能潜力评价与热源空间分布研判^[21]。间接勘探法以天然电磁场作为场源,能够反演获取各类

地质参数信息,主要包含地震勘探、磁法勘探以及重力勘探等技术手段^[21]。地震勘探依托地下介质弹性、密度属性的差异性,通过解析对比采集得到的弹性波信号,进而推断地质体的空间形态与物性特征,是识别地质构造、刻画热储区断层空间展布的有效技术。但该方法存在资料解译难度大、探测深度受限、经济成本较高等短板^[21]。

(1) 大地电磁法(MT)

大地电磁法(MT)是依托天然交变电磁场解析地下电性结构的物探技术^[22],目前普遍认为其场源由宇宙射线与地磁场相互作用产生。本研究基于大地电磁测深数据开展三维建模与反演计算,选取同一测线的两条剖面开展二维反演剖析,结果显示剖面西侧电阻率结构具备相似响应特征。MT作为频率域测深手段,依靠天然磁场实现地下探测,具备探测深度大、分辨能力突出等优势。其基础理论将地下简化为水平层状介质,地表接收垂直入射的电磁波,仪器采集正交电磁场分量,观测数据记为 $E_x H_y$ $E_y H_x$ (图3^[23-24])。该方法的探测深度受频率与电阻率共同约束:电阻率条件不变时,低频信号对应地下深部的介质响应,高频信号则反映浅部地层信息。勘查工作中通过采集多频率段的电磁观测信号,求取不同深度地层的电阻率参数,再依据地下电阻率的空间分布规律推断地下地质构造。为最大限度削弱人为活动带来的电磁场干扰,需要在数百千米之外布设参考观测站^[25]。大地电磁测深曲线可以为后续的模拟和反演提供有关结构的信息。如图是Eburru地热田107个地点TE和TM模式的大地电磁测深曲线^[24]。两种模式的视电阻率在低周期均为高值(<0.01 s),随着周期的增加^[23],视电阻率在1s以下逐渐减小。随后,视电阻率上升到10s,然后下降到100s。

(2) 音频大地电磁法(AMT)

音频大地电磁是测量大地电磁之中频率为0.125-8192Hz的部分。此类方法主要针对岩体的电阻率进行探测,确定其规模,埋深等地质信息^[26]。本方法的研究实例是在西咸地热勘探中的应用:AMT法的研究仅获得一条南北向的电性结构,后续安排东西向以及局部的三维AMT法勘探,并在园区内开展MT法研究工作,研究园区的深部电性特征,获取园区深部的蓝田灞河组、高陵群等地层信息,最终获得创新港园区的三维电性结构,为后续开展地

热资源评价工作提供数据支持^[26]。该方法的场源由太阳风与地球磁层、电离层的复杂耦合效应，加之雷电活动产生的天然交变电磁场共同叠加形成^[18]。当大地电磁场向地下入射时，部分能量会被地下介质

吸收，剩余部分则反射至地表；通过采集地表电磁场各分量，便可解析地下地质结构及其空间展布规律。该类物探手段以获取岩体电阻率特征为核心，进而厘定目标地质体的规模、埋深等关键信息。

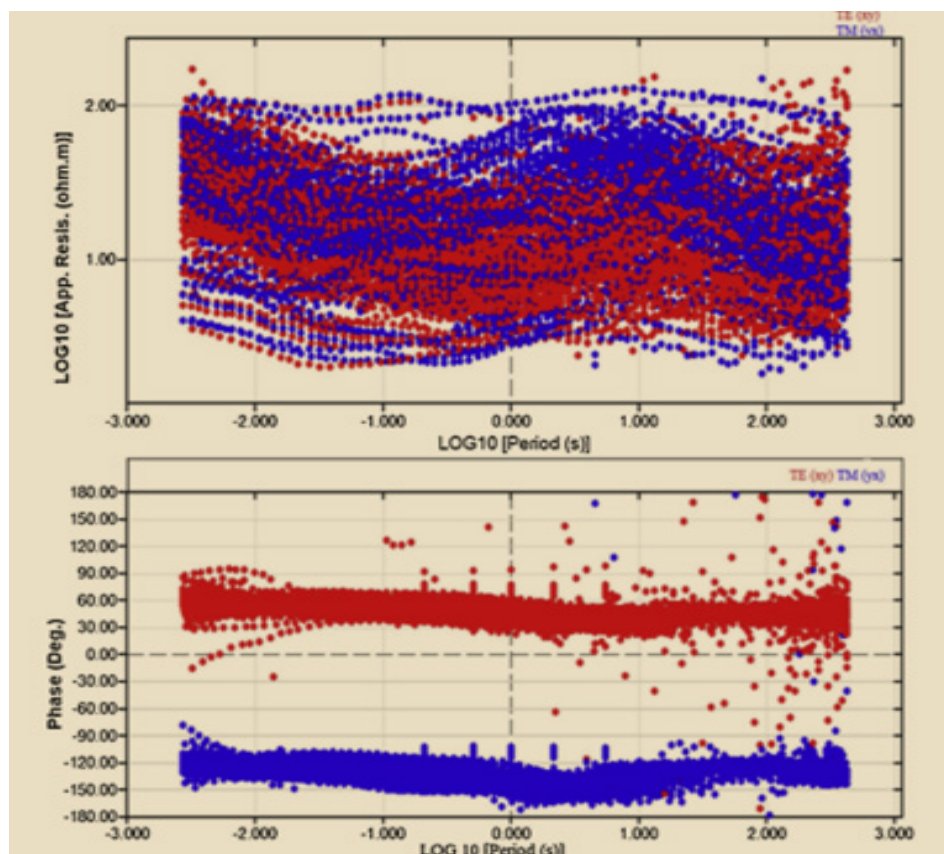


图3 Eburru 地热田 107 个地点 TE 和 TM 模式的大地电磁测深曲线

(3) 瞬变电磁探测法 (TEM)

瞬变电磁法，又称为时间域电磁法^[21]。依靠回线或者接地导线向地下发射双极性脉冲电流，切断供电之后形成一次磁场；一次磁场会在地下导电地质体内部激发涡流（二次感应电流）。电流关断之后涡流不会立刻消失，其衰减速度由地下导体电性决定：导电性越好，涡流衰减周期越长。接收线圈捕捉二次磁场随时间的变化特征，识别地下低阻异常体，得到地下电性结构。对比传统电测深，瞬变电磁受地形干扰小，识别低阻地质体效果优异；一次采集同时得到剖面、测深双重信息，异常特征直观清晰，现场施工简便^[21]。与斯伦贝谢电测深法相比，瞬变电磁法的优势有以下四个方面：施工受地形起伏影响较小；低阻体效果好且施工便捷；信息丰富，一次测量包含剖面 and 测深信息；组合观测、形态简单，异

常响应明显^[19]。

(4) 可控源音频大地电磁法 (CSAMT)

可控源大地电磁法是在音频大地电磁测深基础上发展起来的一种靠人工源提供信号的电磁方法^[21]。在 AMT 技术基础上发展而来。人工布设接地电偶极作为发射源，发射机输出调频交变电流，接收机布置于远场区域，同步采集相互垂直的电场、磁场分量，计算卡尼亚视电阻率与阻抗相位，再开展反演得到地下电阻率断面。探测深度仅和信号频率、地下介质电阻率相关，不受发射电流大小、发射极长度影响。

CSAMT 地质解释的主要依据为二维反演电阻率断面；有钻井约束的剖面可以标定岩体边界；岩石物性测试得到的电阻率-岩性关系，是电性异常地质解释的基础。依托反演结果可以划分地层、圈定

岩体接触边界、识别断裂构造，圈定地热成矿有利区段；二维反演结合三维地质填图，能够区分完整基岩与断裂破碎基岩的电性响应差异^[28]。CSAMT剖面地质解译主要依托以下依据：二维反演电阻率断面揭示的地下电性结构与异常分布，是开展地质解释的基础；钻井约束测线的CSAMT反演结果，可

为岩体圈定提供实证支撑；岩石电阻率的变化规律，则是解析电性断面各类异常的物性前提（图4）。综合以上条件，可完成岩体接触边界划定、地层单元划分、断层识别勾绘以及潜在矿化有利区预判。借助CSAMT二维反演成果结合三维地质填图，可有效区分破碎断裂基岩与完整基岩^[10,29,30]。

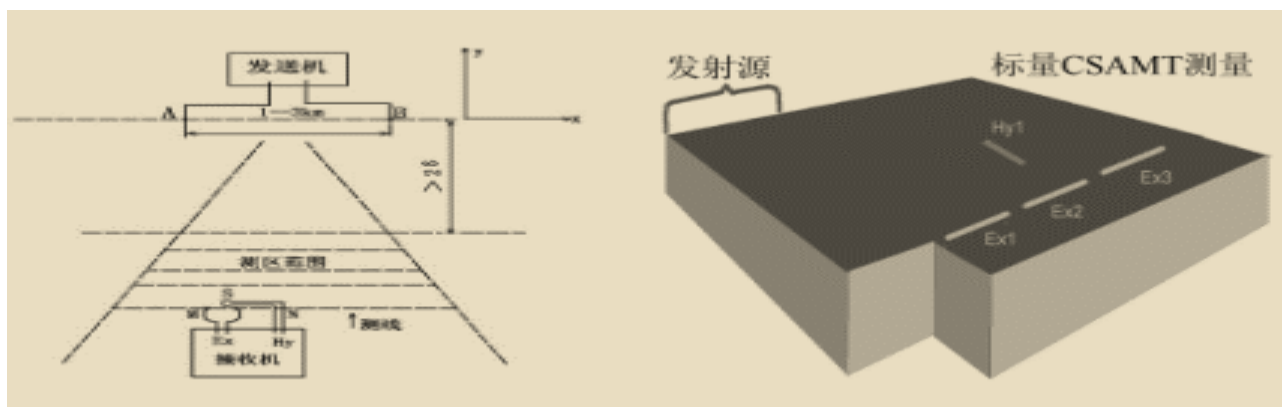


图4 CSAMT基本原理

2.2 小结

地热储层岩石升温会产生双重作用：一方面温度升高使地下水溶解度增大、流体黏度减小，造成地下水电阻率下降；另一方面岩石骨架的电阻率也会随温度增高而减小。两种机制共同作用，使得地热储层相较于围岩通常呈现低电阻率响应，这也是电磁法识别热储的物性前提。深部环境中，地表接收到的地热异常信号会发生衰减，部分物探技术的应用效果受到制约。MT与AMT采用天然场源，无需人工供电，可穿透高阻屏蔽层，对低阻地质体响应灵敏，最大探测深度可达数百千米，在地壳结构解析、能源矿产勘查领域应用较多；但天然场源存在抗干扰能力较弱的缺陷。CSAMT采用人工可控场源，有效提高数据信噪比，更适配中等深度干热岩勘探工作^[1]。

电磁测深法以麦克斯韦方程为理论基础，利用电磁波在地下介质中趋肤深度随频率改变这一规律，在地表采集从高频到低频的电磁响应信号，经数据处理反演得到地下由浅至深的电性结构。该方法具备诸多优势：无需人工供电、作业成本低、野外实施便捷、可穿透高阻层、对低阻目标敏感，勘探深度仅由频率控制，最大可达数百千米，因此被大量用于地壳-上地幔结构研究、地震与火山深部构造解析、资源能源勘查以及水文、工程、环境地质等多个方

向^[18]。

现如今电磁测深已成为地热田勘查的核心手段。介质电阻率受多重条件共同约束，包含岩性、矿物组成、孔隙度、含水饱和度、地层水矿化度等。温度上升会提升固体矿物溶解度，同时降低流体黏度，促使地下水电阻率减小；加之岩石骨架电阻率同样随温度升高而降低，最终表现为热储层电阻率普遍低于围岩，构成电磁法识别地热储层的物理依据。

2.3 仪器总结

通过阅读文献，整理了MT AMT CSAMT三种方法常见的仪器，并整理表格进行比较，最终的出可控源的音频大地电磁法是最优选择^[19-20]。

(1) MT需仪器^[27]：①MTU-5A, System2000。②电接收机：V8-6R, RXU-3E, 磁传感器：AMTC-30, MTC-50, MTC-50H。③美国EMI公司：MT系统电磁仪。

(2) AMT需仪器^[20]：MTU-5A仪器。

(3) CSAMT需仪器^[19-20]：①加拿大凤凰地球物理公司：V5、新一代多功能大地电磁测量系统V8。②美国Zonge工程公司：GDP-32II多功能电法仪，第四代可控源和天然场源电法及电磁法探测多通道接收机，反演软件：SCS2D。几种物探方法各有利弊，总结如下：

表 1 三种物探方式比较

物探方法	MT	AMT	CSAMT
使用仪器	V8	MTU-5A 系统电磁仪	GDP-32II 多功能电法仪
频率范围	0.0005-1.0 kHz	0.1-10 kHz 侧重于高频	8192-0.125 (Hz)
产品参数	主接收机: 3 磁道 3 电道, 24 位模数转换器。电流: 0.5-40A	24 位模数转换器 3 个磁道+2 个电道	通道数: 16 最大输入电压: ±32V 收发距约为 8 km
工作效率	低	高	高
发射源	天然场源	天然场源	谐变偶极子
单点成本	高	较高	高
主要缺点	抗干扰能力差	抗干扰能力差	基岩面之下垂向分层能力低
抗噪能力	低	低	较高
探测深度	1-300 km	50 M-3km	50M-3km
通带灵敏度	250 mv/nT	250 mv/nT	100 mv/nT

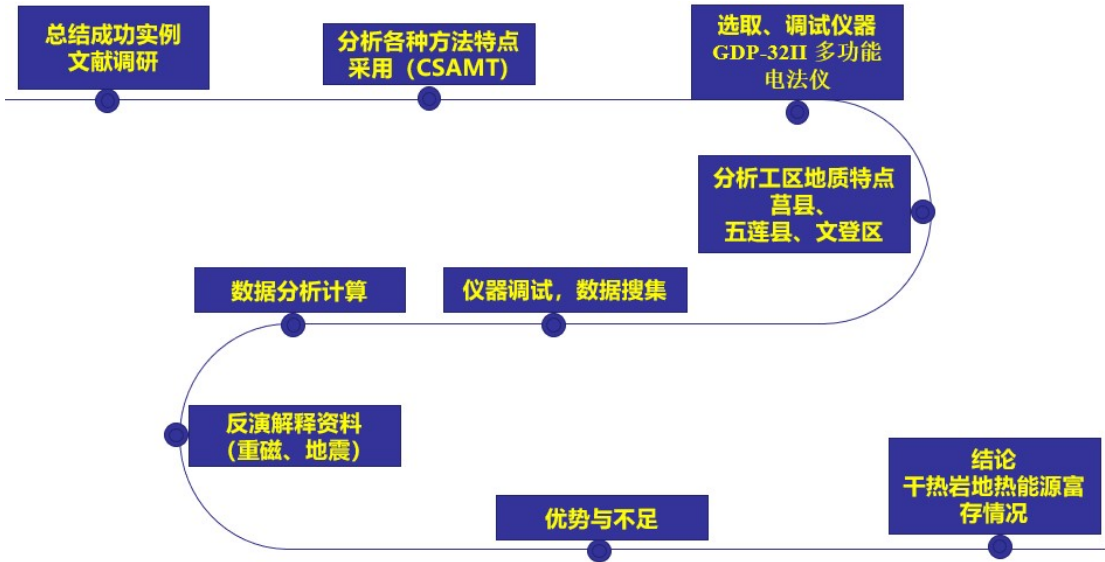


图 5 技术流程图

3 区选择与评价

3.1 方法流程

见图 4。

3.2 靶区选择

参考干热岩岩石学性质，以及选择靶区时应该重点关注的位置，提出以下 4 步观点^[8,25,31]。前期结合重磁资料完成对靶区圈定^[32]。

- (1)圈定干热岩勘探远景区。(地质、水文资料)
- (2)重力磁法资料、前期遥感资料。(找到作为有利干热岩靶区)
- (3)CSAMT 获取干热岩地热资源的热储层赋

存状态。(盖层厚度、热源分布，岩体探测)

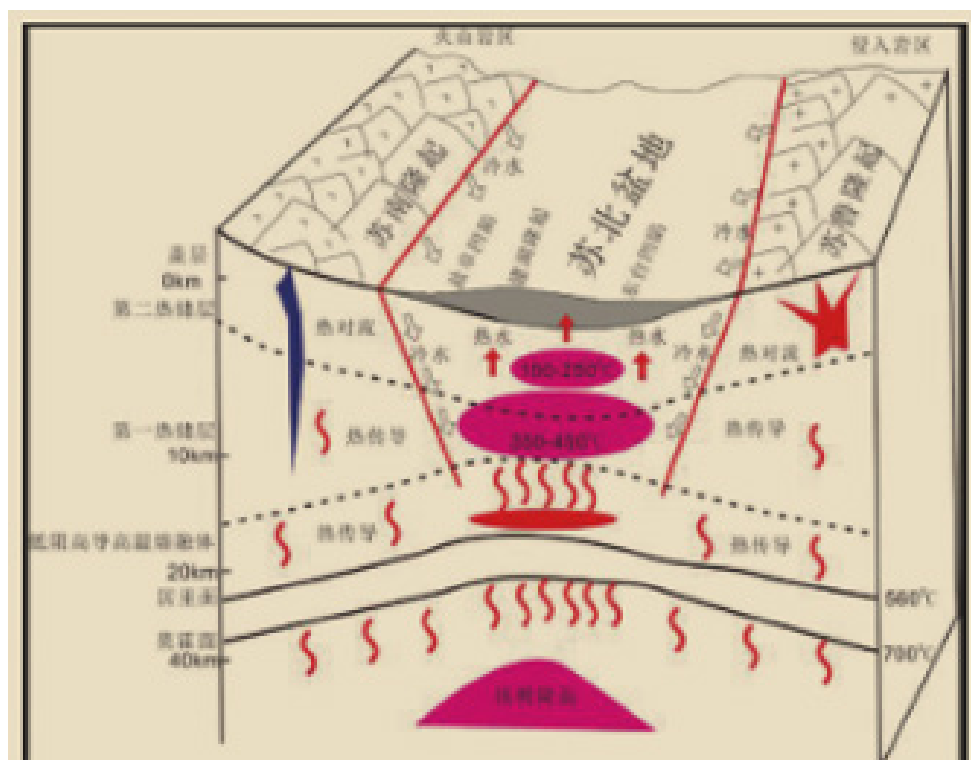
(4)利用钻井测温结合物探资料、地质资料进行对比获取热储层、盖层岩性、热储层岩体温度分布、热流值、热导率等信息，为干热岩工程选区提供依据。(开发监测)

3.2.1 苏北盆地

新生代苏北盆地处于持续活跃的洋陆构造带内，特殊的构造位置使区内拥有相对高的大地热流值和较大的地温梯度，具有巨大的地热资源潜力^[29]。盆地内不仅存在浅部中低温地热资源，而且推断出盆地深部拥有温度较高的干热岩资源，其热源主要来

源于深部的地幔，是本地区新生代区域伸展裂陷、地幔上涌、岩石圈减薄等作用的结果。根据干热岩选区的科学准则，盆地内优势前景区拥有丰富的动态热源、导热效果极佳的热通道、规模巨大的优势热储、良好保温作用的热盖层。初步从沉积型苏北盆地干热岩赋存条件如“源、通、储、盖”的角度，

利用浅部地热异常形迹显示和深部地球物理资料分析了干热岩优势前景选区。刘德民在研究是运用了本区的如下资料：大地热流值图、火成岩分布图、居里面埋深图、莫和面埋深分布图。最终得出苏北盆地地热资源成因模式图，但它的研究没有进行实际勘探，图 6 可直观看出本区的地热来源^[2]。



阻率约 $1200 \Omega \cdot \text{m}$; 个旧组地下 1700-1800 m 标高发育 $300\text{-}630 \Omega \cdot \text{m}$ 低阻层, 推测和泥质含量升高或

者矿化作用相关；同时浅部薄层变玄武岩同样会造成低电阻率异常响应，图 8。

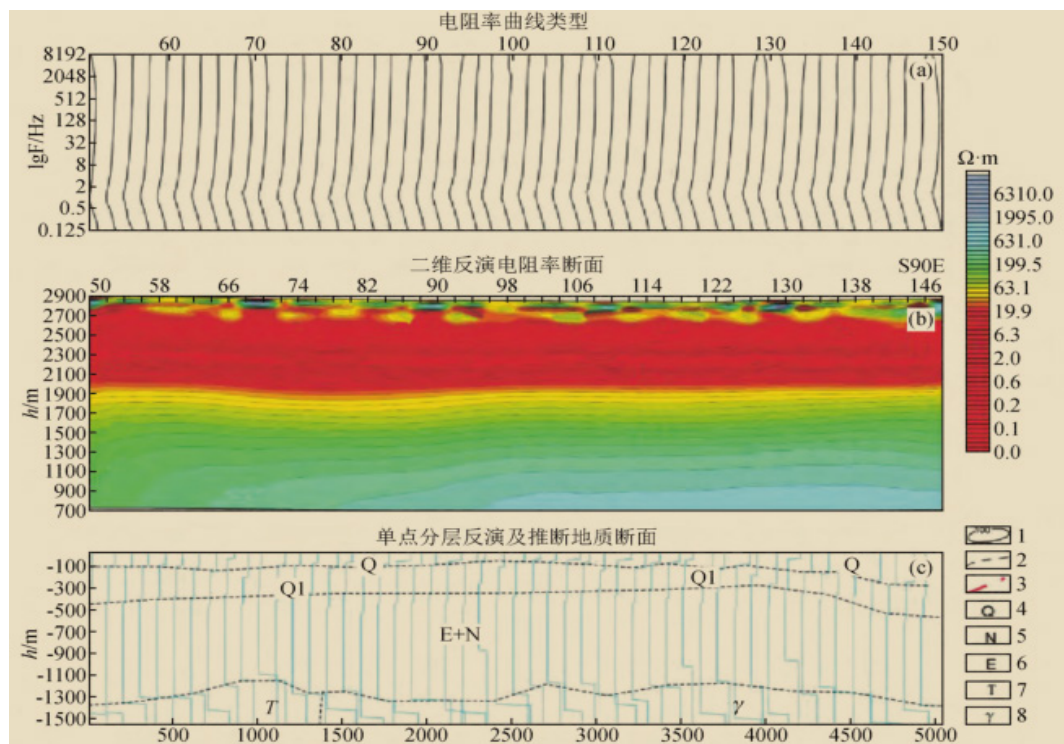


图 7 共和盆地地热详查 CSAMT 电阻率及地质解释综合剖面

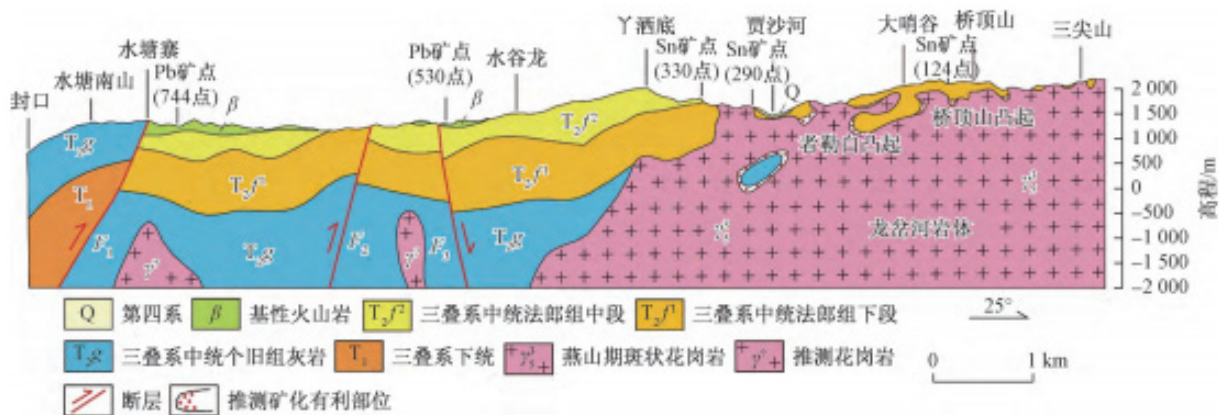


图 8 云南个旧地区地震解释剖面图

4 结论

(1) 电磁测深依靠地下电阻率差异识别地热储层, 电阻率受岩性、矿物组分、孔隙度、含水饱和度、地层水矿化度多重条件共同控制。温度升高会同时降低地下水与岩石骨架电阻率, 地热储层相比围岩普遍表现低电阻率特征, 这是电磁勘探识别干热岩储层的核心物理基础。

(2) 科学筛选干热岩靶区、确定工程场址直接

决定开发项目成败。优先筛选地表地热异常显著、地温梯度与大地热流高、温泉出露多、新生代火山发育区域；部分区域地表地热显示弱，但花岗岩放射性产热能力强，同样可以作为试验场地。

(3) 在研究的前期可以加入遥感、地理信息系统的研究。地下活动反映于地表, 将地理与地质结合。卫星和航空图像可以绘制与新出现的地热流体和诸如热通量等属性有关的次生矿物沉淀区域。

参考文献

- [1] 那金,姜雪,姜振蛟.康定-老榆林地热系统氢氧同位素迁移数值模拟分析[J].地球科学,2021,46(07):2646-2656.
- [2] Donald W. Brown, David V. Duchane, Grant Heiken, Vivi Thomas Hriscu. Mining the Earth's Heat: Hot Dry Rock Geothermal Energy[M]. Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2012.
- [3] Guiling Wang. Overview on hydrothermal and hot dry rock researches in China[J]. China Geology, 2018,2:273-285.
- [4] Chuan Lu. Occurrence types and genesis models of hot dry rock resources in China[J]. Environ Earth Sci, 2017(76): 643-662.
- [5] Yin W, Zhao Y, Feng Z. Experimental research on the rupture characteristics of fractures subsequently filled by magma and hydrothermal fluid in hot dry rock[J]. Renewable Energy, 2019, 139: 71-79.
- [6] 陈作.国内外干热岩压裂技术现状及发展建议[J].石油钻探技术,2019,11(47):1-8
- [7] Zhou Z, Jin Y, Zeng Y, et al. Investigation on fracture creation in hot dry rock geothermal formations of China during hydraulic fracturing[J]. Renewable Energy, 2020, 153: 301-313.
- [8] 陈雄. 地球物理方法在干热岩勘查中的应用研究[D]. 吉林:吉林大学, 2016
- [9] 毛翔. 世界干热岩地热资源开发进展与地质背景分析[J]. 地质评论, 2019, 65(6): 1462-1472.
- [10] 郭盼. 湖北省干热岩地热资源赋存条件及远景分析[J]. 安全与环境工程,2019,27(6):48-68.
- [11] 闫佰忠. 山东省东营市东营区地热资源特征及储量评价[J]. 地质资源与勘查,2019,5:22-27.
- [12] 马哲民,谭现锋,郝俊杰. 多种测温方法在青海共和干热岩 GR1 井中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2020, 47(12):42-48.
- [13] 余小灿,刘成林,王春连. 锂同位素地球化学在大陆地热体系研究中的应用[J]. 地球科学进展,2020,35 (3):246-258.
- [14] 商宇航. 基于瞬变电磁法和同位素测氦法的煤层综合探测[J]. 黑龙江科技大学学报,2020,30(1):15-21.
- [15] 袁建飞. 硼及硼同位素地球化学在地热研究中的应用[J]. 四川地质学报,2017,4 (12):686-691.
- [16] 龚晓凌,葛雁. 南阳市碳酸盐岩地热流体同位素特征分析[J]. 陕西水利, 2019,5: 121-123.
- [17] 罗绍强,徐琳,唐华. 西藏日喀则市查孜地热田水化学及同位素特征研究 [J] . 中国地质调查,2020,7(5): 10-15.
- [18] Kana J D, Djongyang N, Raïdandi D, et al. A review of geophysical methods for geothermal exploration[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 44: 87-95.
- [19] 李忠平. 2020. 基于高密度电法温纳装置的三维电阻率反演应用. 地球物理学进展,35(3):0970-0975.
- [20] 翟昆,高密度电法不同装置的勘探效果对比 [J]. 2020, (8): 161-162
- [21] 杨震. 可控源音频大地电磁法在个旧西区深部地质结构探测中的应用[J]. 科学技术与工程,2020,20(26): 10605-10610
- [22] 赵诚亮. MT 法在文登地区干热岩资源勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019 ,16(4):525-529
- [23] Maithya J, Fujimitsu Y. Analysis and interpretation of magnetotelluric data in characterization of geothermal resource in Eburru geothermal field, Kenya[J]. Geothermics, 2019, 81: 12-31.
- [24] Yadav K, Shah M, Sircar A. Application of magnetotelluric (MT) study for the identification of shallow and deep aquifers in Dholera geothermal region[J]. Groundwater for sustainable development, 2020, 11: 100472.
- [25] 马鹏鹏. 干热岩勘探开发技术现状和发展[J]. 工艺技术, 2020,11:221-222
- [26] 张炯. 音频大地电磁测深法在西咸地热勘探中的应用[A]. 中国地球科学联合学术年会,2016:2146-2148.
- [27] 谭慧. 广域电磁法在海南深层干热岩探测中的应用[J]. 综述专论,2020,1:150-152.
- [28] 张利. CSAMT 法在地热法勘探中的应用[J]. 煤炭与化工 2020,43(9):88-90.
- [29] 刘德民. 苏北盆地干热岩地热资源前景分析[J]. 地学前缘 (中国地质大学(北京);北京大学), 2020,27(1):48-54.

- [30] 张英.渤海湾盆地中南部干热岩选区方向[J].地学前缘(中国地质大学(北京);北京大学), 2020,27(1): 35-47.
- [31] 杨冶.干热岩勘探过程中地球物理方法技术应用探讨.地球物理学进展, 2019, 34 (4):1556-1567.
- [32] 窦凤珂.干热岩勘查及开发利用的关键技术[J].资源与环境,2020,10:157-158.
- [33] 陈希节.青海共和盆地中三叠世花岗岩组合岩石成因: 地球化学、锆石 U-Pb 年代学及 Hf 同位素约束[J].岩石学报,2020,10(13):3152-3170.
- [34] 张超,胡圣标,宋荣彩. 共和盆地干热岩地热资源的成因机制:来自岩石放射性生热率的约束[J].地球物理学报,63(7):2697-2709.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS