

地热资源电磁法勘探现状及展望

吴佳文, 胡祥云*, 黄国疏, 彭荣华, 周文龙

中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 湖北武汉 430074

摘 要: 地热资源作为一种储量丰富、无污染、持续稳定的可再生能源, 正受到国际社会的普遍关注。电阻率与地热环境中的孔隙度、渗透率、含盐度、蚀变及温度等关键参数紧密相关, 是表征地热属性最为灵敏的参数。作为获得地下电性结构的一种重要地球物理勘探方法, 电磁勘探方法具有探测范围广、深度大、精度高且经济高效等特点, 被广泛应用于地热资源勘探。本文主要对电磁探测在地热资源的应用与发展现状、地热电磁成像及地热要素电性特征等方面进行综合论述。然后, 根据电磁勘探在地热区的应用实例, 总结了电磁法在地热勘探中的适应性、有效性及准确性。最后, 对地热资源混场源超宽频电磁数据采集、高精度反演成像及关键地热属性识别等前沿科学问题与方法技术进行了展望。

关键词: 地热资源; 电磁法; 电阻率

中图分类号: P314; P631 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.120501

Status and Prospects of Electromagnetic Method Used in Geothermal Resources Exploration

WU Jia-wen, HU Xiang-yun*, HUANG Guo-shu, PENG Rong-hua, ZHOU Wen-long

School of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074

Abstract: As a clean, sustainable, and renewable energy resource, geothermal energy has attracted considerable attention worldwide. A strong correlation exists between resistivity and geothermal-related parameters, including porosity, permeability, salinity, alteration and temperature. Electromagnetic methods have been widely used in geothermal exploration to effectively determine subsurface electrical structures, and are characterized by a wide detection range, high accuracy, low cost, and can reach large depths. This study mainly discusses the application and development of electromagnetic exploration in geothermal resources, geothermal electromagnetic tomography, and the electrical characteristics of geothermal elements. The applicability, effectiveness, and accuracy of electromagnetic methods in geothermal exploration are summarized based on examples of electromagnetic exploration in geothermal areas. Finally, the prospects of frontier methods and technologies in geothermal exploration and exploitation such as hybrid source ultra-wide electromagnetic data acquisition, high-precision inversion imaging, and major geothermal attributes identification are described.

Key words: geothermal resources; electromagnetic method; resistivity

地热资源勘探是地热开发利用的重要前提, 其聚焦于对表征地热环境的相关参数指标进行直接或间接测量, 以反映各地热要素物理性质及空间分布特征, 进而对潜在地热资源进行探查与评估。随着地热勘探目标深度的不断增大, 地热系统地质结构和构造更加复杂, 地热资源的勘探难度也在不断增

加。地球物理探测作为地热资源开发利用重要手段, 在地热勘探、资源评价、地热开发监测等方面均起着十分重要的作用。其中, 地震勘探方法是一种高分辨率物探手段, 多年来广泛用于石油、天然气和地热资源热储层构造的高精度成像, 但在反映地热系统深层结构性质与组成方面存在不足, 且成本高

本文由中国地质调查局地质调查项目“全国大地热流值测量与靶区优选”(编号: DD20190128)资助。

收稿日期: 2022-05-30; 改回日期: 2022-12-05; 网络首发日期: 2022-12-06。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 吴佳文, 男, 1998 年生。硕士研究生。地质工程专业。E-mail: 1202020644@cug.edu.cn。

*通讯作者: 胡祥云, 男, 1966 年生。教授。主要从事电磁探测与深部资源勘探理论研究。E-mail: xyhu@cug.edu.cn。

昂。与地震成像技术相比,电磁探测技术具有成本低、绿色环保、设备便携等特点,近年来随着电磁勘探设备的改进与数据反演解释方法的进步,电磁探测准度和精度均有提高,已广泛应用于地热资源勘探,并在许多国家已成为地热系统勘探的行业标准(Muñoz, 2014)。本文旨在梳理电磁法在地热资源勘探中的发展与应用现状,阐述电磁法在解决地热核心问题中的适应性与有效性,讨论地热电磁探测的不足与未来技术发展方向,为利用电磁法精准探测地热资源提供方向性指导。

1 地热资源电磁探测现状

电磁法在高温地热资源的探测过程中具有独特优势,它能够揭示地下介质的电性结构特征。电阻率是地下介质电性特征的主要表征参数之一。一方面,地下介质的电阻率与表征地热环境的重要参数如温度、含盐浓度、孔隙度、渗透率等相关(Archie, 1942; Berkold, 1983; Flóvenz et al., 1985; Anderson et al., 2000);另一方面,地下构造带、地热资源的热源、热储层和盖层等不同部位的电阻率也具有明显差异(Spichak and Manzella, 2009; Muñoz, 2014),这不仅为利用电磁法实现地热资源有效探测奠定了基础,也对热源、导热通道和热储层的精准识别与圈定创造了有利条件(唐显春等, 2023)。

根据热储温度与赋存埋深特征,我国地热资源可划分为浅层地热能、水热型地热资源和干热岩三大类(王转转等, 2019)。地热资源埋藏深度不同,适用的电磁勘探方法也不同,表 1 给出了不同类型地热资源常用的电磁探测方法。按场源类型不同,可将表 1 中电磁法大致分为人工源电磁法和天然源电磁法。其中,人工源方法主要包括瞬变电磁法(TEM)、可控源音频大地电磁法(CSAMT)和广域电磁法(WFEM),近年来已广泛运用于浅中部地热资源探测,并在地热模型建立、地热要素识别及地热解释等方面表现出良好探测效果(田红军等, 2020; Montecinos-Cuadros et al., 2021; 任小庆等, 2022)。天然源方法主要包括音频大地电磁法(AMT)和大地电磁法(MT),其中 MT 由于其观测频率范围通常为 $10^{-4} \sim 10^4$ Hz,在所有电磁法中勘探深度最大,是确定深部高温地热系统热源最有效的方法。目前,

AMT 和 MT 已广泛应用于火山地热区地热结构调查、地热评估和水热流体循环(Meju, 2002)。

人工源电磁法具有浅层分辨率高、抗干扰能力强等特点,但其所激励的场源为中高频电磁场,导致在探测深度方面存在一定局限性;天然源电磁法(尤其是 MT)可对低频电磁场进行观测,具有勘探深度大的特点,但其对浅层电性结构分辨率不高,且天然电磁场信号微弱,极易受到电磁干扰,导致数据质量降低。两种类型电磁方法各有所长,各有所短,二者可互为补充。在地热资源勘探中,应根据探测目标特征和工区实际条件选择合适勘探方法,方能实现对地热资源的有效探测。

目前,地热资源电磁探测技术正由单一方法向多方法组合探测方向发展,综合地球物理方法可弥补单一方法的探测缺陷,并对探测结果进行相互验证,提高地热资源勘探广度与精度。He et al.(2016)结合 MT 和 AMT 方法对西藏 Mapamyum 地热田进行电磁成像,AMT 探测结果对浅层电性结构进行了补充,探测结果很好地揭示了研究区深部热源位置、导热通道及浅部热储分布范围。Marwan et al.(2019)在 MT 二维反演过程中加入 TEM 数据,对 MT 静态效应进行校正,展示了印度尼西亚 Seulawah Agam 火山地热系统中可能存在的热源以及热储层等地热要素的位置。裴发根等(2021)以 MT 和 CSAMT 综合地球物理方法为手段,查明了齐齐哈尔龙安桥地区低温地热资源的热源、通道、热储及盖层的空间配置关系,确定了该区地热系统成因模式。此外,诸多研究人员结合电磁法与重力、磁法及地震等物探方法对地热系统进行研究评价(Jousset et al., 2011; Soengkono and Reeves, 2016; Yadav and Sircar, 2019)。综合物探方法提供了多种不同物性参数,能够帮助研究人员更清楚地了解地热系统,建立更为准确的地热地质模型以及圈定地热开发潜力区域(唐显春等, 2020, 2023)。

由于地下地热资源结构与构造的复杂性,传统单一物性反演方法对地热系统的反映具有模糊性和不确定性。近年来,针对地热资源的多物性联合反演算法得到不断发展并逐步应用于地热资源探测。AMT 和直流电法(DC)非线性联合反演(Santos et al., 2007)、TEM 和 MT 的 OCCAM 一维联合

表 1 不同类型地热资源常用电磁勘探方法
Table 1 General electromagnetic method used in different types of geothermal resources

序号	地热资源类型	埋藏深度	常用电磁勘探方法
1	浅层地热能	<200 m	瞬变电磁法(TEM)、音频大地电磁法(AMT)
2	水热型地热资源	200~3000 m	音频大地电磁法(AMT)、可控源音频大地电磁法(CSAMT)、广域电磁法(WFEM)、大地电磁法(MT)
3	干热岩	>3000 m	大地电磁法(MT)

反演(Árnason et al., 2010; Lichoro et al., 2017)、重磁电交叉梯度联合反演(Yadav and Sircar, 2019)等方法已成功应用于地热资源电磁成像, 在反演过程中表现出良好的有效性与准确性。

2 地热资源电磁成像方法

2.1 地热系统各要素电性结构特征

热源、导热通道、热储层和地热盖层统称为地热系统四要素, 在地热资源形成过程中具有重要作用。地热资源的热量来源通常由深部高温部分熔融体、未冷却的岩浆房、地幔热及花岗岩放射性生热组成(Han et al., 2021)。其中, 部分熔融体和未冷却岩浆房是多数水热型地热资源与干热岩的热源, 在电性上表现为低阻特征; 少部分干热岩热源以放射性生热与地幔热为主, 其中放射性生热多以花岗岩为载体, 在电性上表现为高阻特征(图 1)。

作为地热资源的导热通道, 深大断裂通常将热储层与热源相连通, 其对热量传递的控制作用主要表现在两方面: 做为深部热源的部分熔融或岩浆侵入深大断裂向上运移至浅部, 加热地下水形成高温地热异常; 地下水在深大断裂中被加热发生深部水热循环, 沿断裂向上运移并与浅部冷水混合, 形成地热资源。因此, 地热系统断裂破碎带中常富含地热流体或地下水, 呈现出低阻特征。

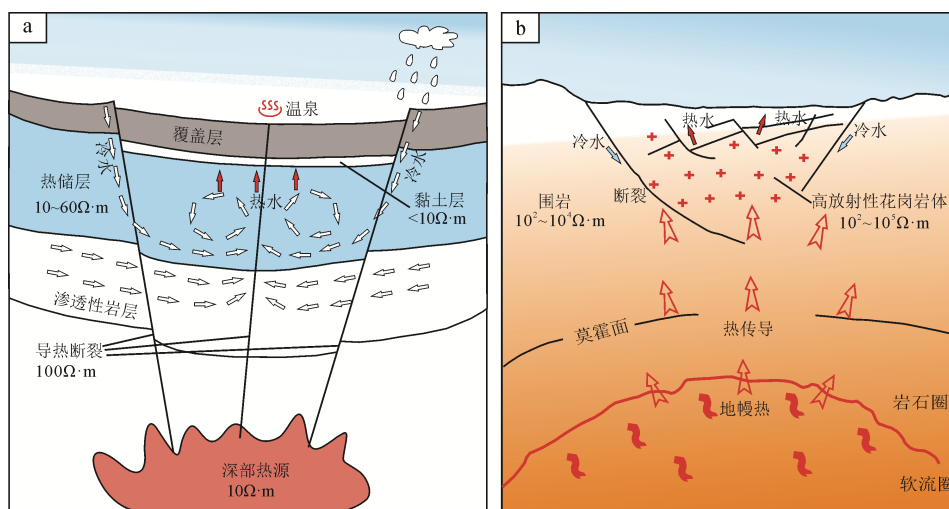
水热型地热资源热储层通常是由充满地热流体的断裂或裂缝系统组成, 由于地热流体中通常含有高浓度溶解盐, 且温度的升高会导致岩石体电阻率的降低, 电性上表现为明显低阻特征, 这为利用电磁法进行热储层探测提供了有利条件。干热岩热储层多以花岗岩体为主, 温度明显高于围岩, 电磁探测结果中表现为高阻异常。

水热型地热系统盖层多为一些水热蚀变形成的“黏土帽”、新生代碎屑沉积物和第四系松散沉积物。其中“黏土帽”是由于热储层中地热流体与岩石长期相互作用发生水热蚀变, 在热储层上方形成黏土盖层。不同温度下形成的黏土矿物种类不同, 但总体上均表现为低阻特征, 其电阻率低于热储层, 这是识别地热系统的另一标识。干热岩盖层以第四系松散沉积物为主, 部分包含砂岩、泥岩和火山岩等, 电性上多表现为低阻异常。此外, 由于干热岩具有低孔隙度、低渗透率及流体含量少等特征, 因此黏土层基本不发育。综上, 大部分地热资源盖层呈现出低阻特征, 只有少数以火山岩为主的盖层表现为高阻特征。

此外, 地热系统各要素在空间上呈现出一定的分布规律。地热资源的形成模式通常表现为深部热源散发热量, 热量沿导热通道向上传递, 在浅部保温盖层的作用下, 减少热量散失, 在盖层下方形成地热储层。总体来看, 水热型地热资源各地热要素均具有良好的导电性, 与围岩之间具有明显电性差异。然而, 在电磁探测结果中, 并不是所有低阻异常都与地热系统有关(Kuyumcu et al., 2012), 为避免电阻率模型的错误解释, 应结合尽可能多的物性参数与地质资料对电阻率模型进行综合解释。综上, 根据各地热要素的电性特征、空间分布特征及利用多物性参数综合解释, 可对热源、导热通道和热储层进行有效识别。

2.2 地热资源电磁反演成像方法

对实测电磁数据进行反演成像是获取地热系统电性结构的关键环节, 高精度、高效率的正反演方法是获取地热系统可靠电磁成像结果的基础, 也是建立准确地热地质模型的前提。



a—水热型地热资源; b—高热流花岗岩型干热岩(改自王贵玲等, 2020)。

a—geothermal resource of hydrothermal type; b—granite type dry hot rock with high heat flow (modified from WANG et al., 2020).

图 1 地热系统概念简化模型

Fig. 1 Conceptual simplified model of geothermal system

近年来,电磁法正演模拟与反演算法飞速发展,使得正反演速度、精度不断提高。积分方程法、有限差分法、有限单元法、谱元法以及有限体积法是频域电磁法数值模拟的主要方法。其中,有限单元法对地电模型采用非结构化网格剖分,在处理复杂异常体以及起伏地形的数值模拟中具有较好的适应性与灵活性,本节将重点介绍有限单元法在电磁数值模拟中的进步。目前,有限单元法在电磁场正演模拟中的进步主要体现在微分控制方程、有限元空间、网格离散化技术和线性求解器等方面。电磁场模拟可基于电场方程、磁场方程和势场方程。由于空气层电导率为零,电场方程和磁场方程均不能有效解决低频电磁场模拟问题,而势场方程产生的离散系统矩阵条件数通常较低,其对求解器的要求低于电场方程。在有限元空间中,节点基函数在电性不连续界面强加了法向连续性条件,导致容易产生伪解,为提高电磁场求解效率与精度,通常使用矢量基函数替代节点基函数。网格离散化技术正由结构化网格剖分向非结构化网格剖分方向发展(Key and Weiss, 2006),非结构化网格可很好地模拟地下复杂地质结构与地形起伏,并且可对目标体网格实现自适应加密,提高数值模拟精度。求解器方面,相比于迭代求解器,基于MPI并行的直接求解器在求解超大规模电磁问题时更具鲁棒性。

电磁反演算法主要分为两种:线性迭代反演算法和非线性反演算法。常用的线性迭代算法包括高斯-牛顿法及其变种、共轭梯度法及其变种。高斯-牛顿法广泛应用于可控源电磁法的反演问题,而共轭梯度法相比其具有稳定、计算效率高等特点。随着参数的增多,线性迭代算法严重依赖于初始模型,且迭代过程中容易陷入局部极小值,造成计算结果震荡和无法收敛。为克服线性迭代反演算法的多种缺陷,国内外学者提出了模拟退火法、贝叶斯反演和遗传算法等多种非线性反演算法,非线性反演算法在全局搜索极大值或极小值,保证了反演模型的全局最优性。目前,线性迭代算法常用于二维和三维电磁反演问题,而非线性反演算仅用于一维或小规模二维电磁反演问题(汤井田等, 2015)。电磁法正演模拟与反演计算密不可分,反演本质上也是一种正演的过程,提高正演精度与计算效率,反演速度和计算精度也将得到相应提升。

3 地热资源电磁探测实例:大同盆地东北部地热探测

大同盆地是新生代断陷盆地位于华北克拉通中部造山带北侧(图 2),该地为大陆岩石圈伸展破裂区,

盆地具有裂谷构造特点(Zhang et al., 1998)。大同盆地的形成对应于华北克拉通中西部岩石圈破坏和持续的伸展减薄运动,其动力来源可能为印度—欧亚板块和太平洋—欧亚板块的碰撞作用(Kusky and Li, 2003; 李三忠等, 2011; Li et al., 2012)。大同盆地内构造活动强烈,区内发育有一系列活动断裂,且伴随有火山活动和地震活动(岑敏等, 2015)。新生代晚更新世以来,大同盆地在深部岩石圈持续减薄作用下,地壳在伸展应力作用下发生破裂,岩石圈被贯通,深部岩浆物质沿断裂上涌并喷出至地面,形成大同火山群。喷发后的岩浆通道迅速冷却,未喷发的岩浆沿构造裂隙运移形成岩浆房,由于大同盆地内断裂构造走向均为NE向,因此岩浆沿断裂多向盆地东北部汇聚,为该地地热资源的形成提供热量来源。大同盆地地震活动频繁,但整体震级偏小,且多集中于大同盆地东北部靠近阳高—天镇一带,表明该地区构造活动强烈,为地热资源的形成创造了有利条件。大同盆地内共有五处地热区,其中位于盆地东北部的天镇—阳高地热区温度最高,热储层以太古代变质岩为主,实测大地热流值为 $75.3\sim79.5\text{ mW/m}^2$ (王贵玲等, 2017),明显高于平均大地热流值,具有地热资源形成与赋存的良好地热地质条件。结合大同盆地地质构造背景、构造活动及地热地质特征,表明大同盆地东北部具有地热资源赋存的可能性,将其作为地热勘探开发的优势靶区。

MT 对深部低阻体具有良好的分辨能力,既可用于解释与地热相关的深部岩浆的底侵作用和板块俯冲导致的岩石圈水化过程(Xu et al., 2019; Zhang et al., 2020),又可用于揭示地热系统的深部热源机制、识别地热储层与反映地热地质结构等(Gao et al., 2018; Ars et al., 2019; Maithya and Fujimitsu, 2019)。为了解大同盆地东北部地热资源的赋存状态与分布特征,利用MT和AMT对天阳盆地地热区进行了探查,区内布置了10条MT测线,靠近阳高—天镇一带布置了两个MT测点加密区和两条AMT测线,以研究地热区区域电性结构和阳高—天镇重点区精细化电性结构(图 3c)。数据于2018年通过MTU-5A大地电磁测深仪采集,平均采集时长24 h左右,MT采集频率为 $320\sim0.001\text{ Hz}$,AMT采集频率为 $10\ 400\sim0.35\text{ Hz}$ 。天阳盆地部分地区存在较多电磁干扰,为保证数据质量布置了远参考站,通过测站与远参考站数据进行互功率谱计算可有效提高MT数据质量。利用傅里叶变换将时间域信号转换为频率域数据,经过功率谱挑选、Robust技术(Egbert and Booker, 1986)、远参考技术(Gamble et al., 1979)等处理获得了高质量的阻抗张量信息。

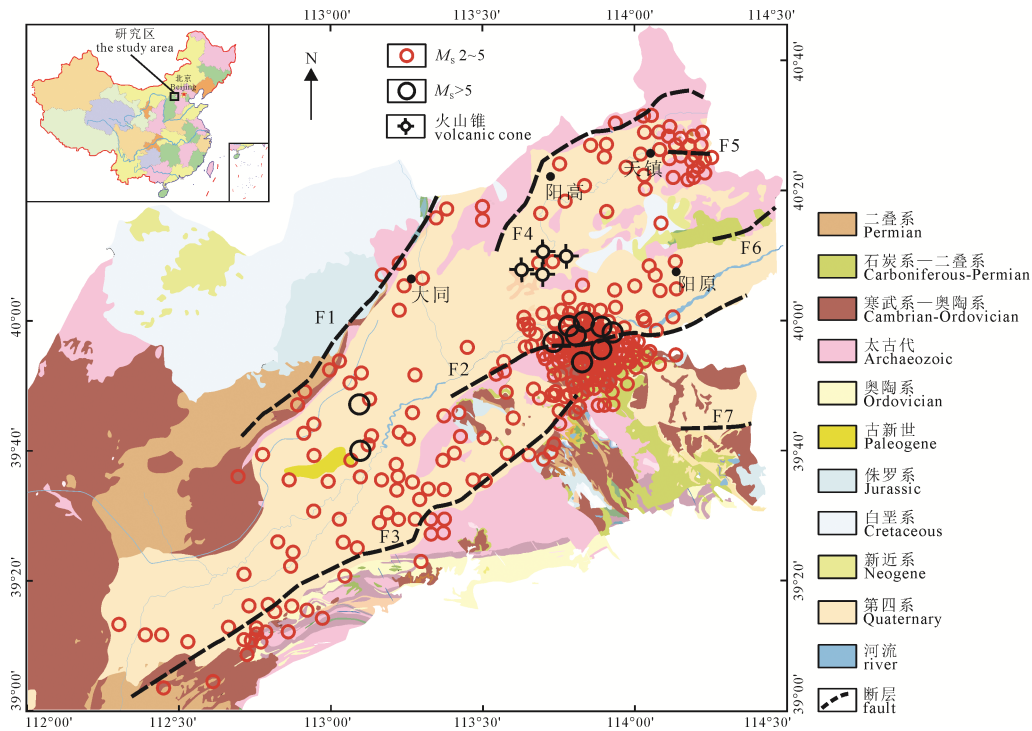
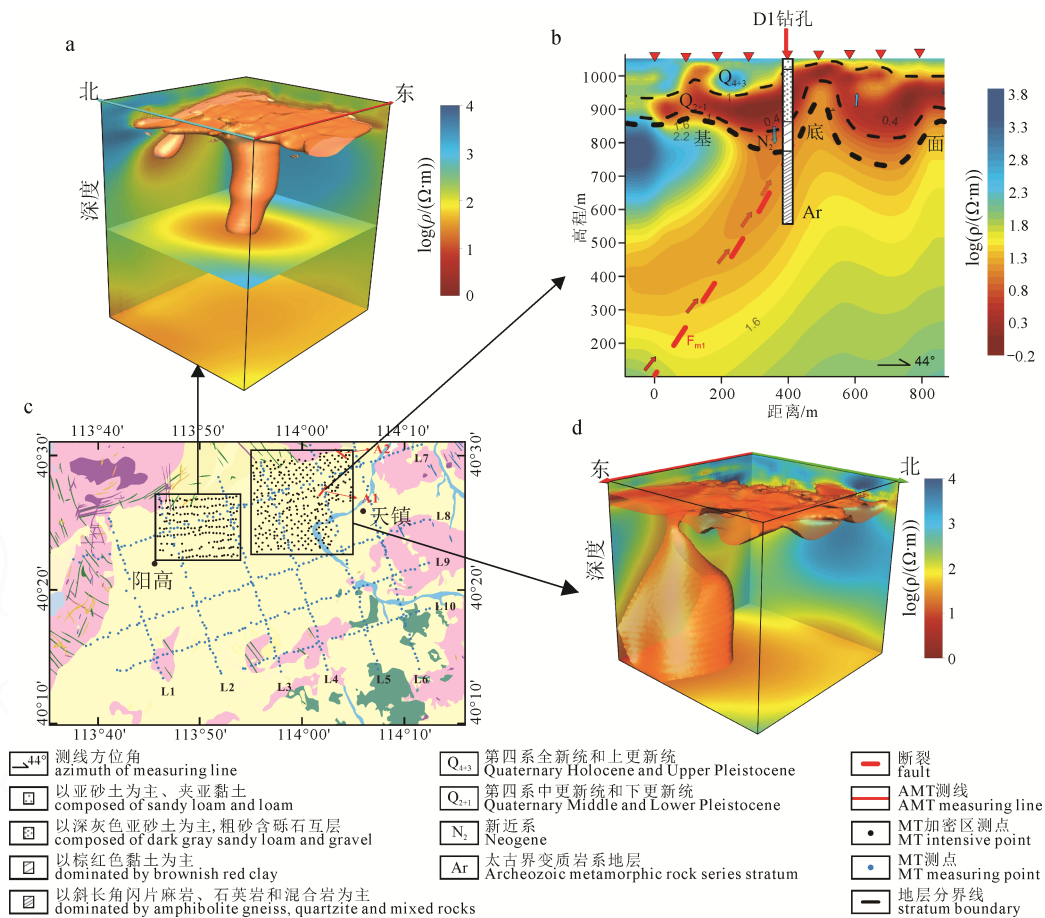


图2 大同盆地构造略图(Zhou et al., 2020)

Fig. 2 Simplified tectonic map of Datong Basin (Zhou et al., 2020)



a—阳高 MT 加密区三维电阻率等值面图(周文龙, 2021); b—A1 线 AMT 二维反演剖面与钻孔地层岩性对比(周文龙, 2021);

c—大同盆地 MT&AMT 测点布置图(周文龙, 2021); d—天镇 MT 加密区三维电阻率等值面图(周文龙, 2021)。

a—low resistivity isosurface for MT three-dimensional inversion in Yanggao (ZHOU, 2021); b—AMT two-dimensional inversion profile for line A1 and drill stratum lithology (ZHOU, 2021); c—location map of MT and AMT measuring point (ZHOU, 2021); d—low resistivity isosurface for MT three-dimensional inversion in Tianzhen (ZHOU, 2021).

图3 天阳盆地地热区电性结构

Fig. 3 Electrical structure in Tianyang Basin geothermal field

非线性共轭梯度(NLCG)算法具有计算效率高且算法稳定等特点,此次 MT/AMT 数据二维、三维反演均采用非线性共轭梯度算法进行计算。图 3b 为天镇加密区内跨过 D1 地热钻孔的 A1 线 AMT 二维反演剖面,剖面中显示有 F_{m1} 次级控热断裂发育,深部低阻体沿断裂上涌,在海拔为 800~1000 m 处形成低阻层。AMT 在浅部反映的电性结构大致可分为四种电性层,结合 D1 孔钻井资料对比分析,每种电性层对应不同的沉积地层。如表 2 所示,基底面以上电性层整体电阻率较低,且岩性以黏土为主,包含部分亚砂土、粗砂和砾石,是地热系统的盖层。盖层以下电阻率明显增高,岩性以太古代变质岩为主,是地热系统的热储层。图 3a、d 为阳高、天镇两地 MT 加密区三维电阻率模型,二者结构具有相似性,主要表现为浅部低阻体与深部低阻体相连通,作为热源的部分熔融体或岩浆通过深大断裂上涌至近地表,加热地下水,浅部岩石与地热流体长期作用发生水热蚀变,在浅层形成具有“黏土帽”特征的低阻层,这是水热型高温地热储层的经典 MT 响应。

根据 MT 二维反演结果(图 4a)显示有 F1 和 F2 两条控热断裂,结合地质资料以及现场岩石出露情况,推断 F1 为云门山断裂, F2 为熊耳山北缘断裂。从电性结构来看,天阳盆地北部主要表现为深部低阻异常体通过电阻率稍高的通道向上运移,在浅部形成相对低阻层和低阻层,分别对应于热源、导热断裂、热储层和覆盖层,其电性结构与对流型地热资源结构模型相似度极高;天阳盆地南侧山区(图 4b)主要表现为深部低阻异常体整体侵入上部高阻岩体,整体上表现出一种隆起的层状电性结构,其电性结构对应于典型传导型地热资源结构模型。总体来看,地热系统各地热要素在电性上既有相似性又有差异性。热源、控热断裂、热储层及盖层导电性均强于围岩,但各自之间电阻率存在一定差异,分别表现为低阻、相对高阻、相对低阻、低阻特征。

4 地热电磁探测技术发展趋势

4.1 混场源宽频电磁数据采集方法

地热系统在空间上存在一定分布规律,且各地热要素埋藏深度不同。目前常用电磁法只对人工电

磁场和天然电磁场其中一种进行观测,且采集方式都是分频段采集,无法同时准确反映整个地热系统(尤其是深部热源和浅层电性结构)的特征。因此,考虑对人工场和天然场进行同时观测,可获取更宽频带范围的电磁信号,实现浅层与深部电性信息互补,从而更准确地反映整个地热系统地下电性结构。

4.2 多尺度联合反演成像方法

地下地热资源的存在会引起地热系统与周围围岩产生密度、磁化率、电阻率以及波速等物理性质上的不均匀性,这为从多角度研究地热资源奠定了基础。地热勘探阶段,可考虑利用多种物探手段对地热资源进行研究,结合同一探测目标的不同响应特征,对地热系统相关信息进行相互验证与补充。在地热电磁成像阶段,将波速、密度及磁化率等物性参数纳入综合考量,实现多物性参数联合反演,可有效降低数据反演多解性、克服单方法局限性和提高模型分辨率,为建立更为准确的地热地质模型提供强有力支撑。

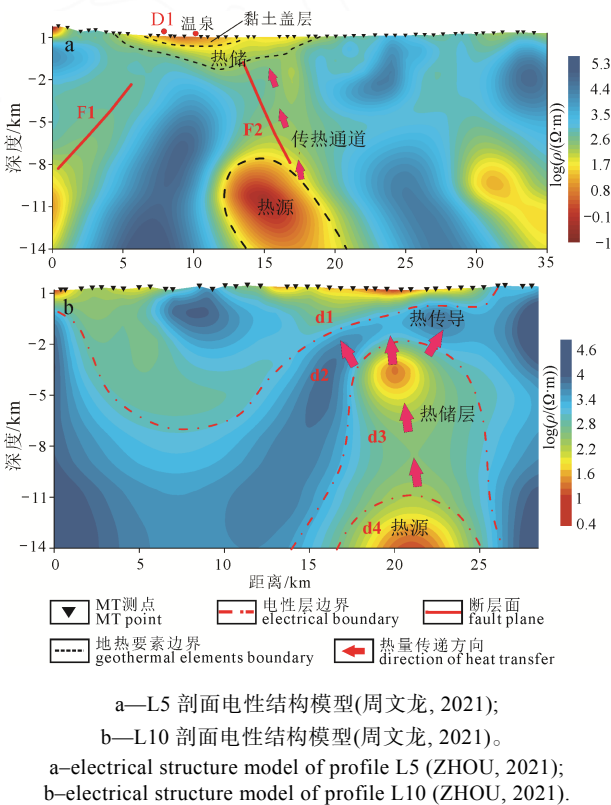


图 4 MT 二维反演电性结构模型
Fig. 4 MT two-dimensional inversion electrical structure model

表 2 AMT 电性结构与钻孔地层岩性对比
Table 2 AMT electrical structure and stratum lithology

序号	电性层	视电阻率	厚度	D1 孔钻井岩性
1	低阻-中高阻	50~500 Ω·m	50~200 m	第四系(Q ₃₊₄)地层,以亚砂土为主,上下部夹亚黏土
2	低阻	1~10 Ω·m	100~500 m	第四系(Q ₃₊₄)地层,以深灰色亚砂土为主,粗砂含砾石互层
3	低阻-中低阻	20~100 Ω·m	50~100 m	新近系(N ₂)地层,以红色黏土为主
4	高阻	150 Ω·m	>1000 m	太古界(Ar)基底,以斜长角闪片麻岩、石英岩和混合岩为主

在进行多物性参数联合反演时,反演参数的增多势必导致计算量增大、计算效率降低。机器学习能够快速处理海量数据,通过不断优化网络结构提升计算速度,将其与联合反演相结合,有望提高正演计算速度和反演计算效率。

4.3 电磁法探测识别关键地热属性技术探索

电磁法在地热资源勘探过程中的应用包括但不限于对地下电性结构进行成像,还可通过电磁数据进行地温场预测、地热开发监测以及地热资源评价等。

影响岩石电导率的因素很多,但其对温度的变化较为敏感,二者之间具有一定联系。Campbell(1949)和 Keller and Frischknecht(1966)使用经验公式反映了岩石电阻率和温度之间的关系,这为利用电磁数据进行地下温度预测创造了条件。Huang et al.(2022)提出了一种最优温度系数校正方法,改进了温度与电阻率间的传统经验公式,使其更符合地下真实情况,并利用 MT 电阻率模型对地下温度分布进行了预测,效果显著。此外,神经网络和贝叶斯方法也应用于电阻率数据对地温场的估算,均得到较为准确的地温估计(Spichak and Zakharova, 2012; Hokstad and Tanavsuu-Milkeviciene, 2017; Ishitsuka et al., 2021)。

增强型地热系统(EGS)是一种对地下低渗透性干热岩体进行水力压裂形成裂缝的人工热储层,其热储的产能很大程度上取决于储层裂缝的渗透性。微地震方法可以反映储层裂缝的位置以及大小,但不能提供裂缝连通性以及裂缝流体的信息。电磁法对电导率的变化比较灵敏,能够监控注入流体后裂缝电阻率的变化,从而反映注入流体在地下的流动位置以及裂缝间的连通性。同时,大规模的水力压裂会引起区域相位张量的变化,对注水前后的 MT 数据相位张量进行分析,能够反映水力压裂形成裂缝的方向性(Peacock et al., 2012; Didana et al., 2017; Abdelfettah et al., 2018)。地热能开发是一个动态的过程,对地热储层进行长期三维电磁观测,可实现地热资源开发的动态监测。

干热岩地热资源潜力评估是干热岩开发利用的基础,电磁探测技术或将成为干热岩地热资源评价的有力工具。对实测电磁数据进行三维反演可获得地热区三维电性结构模型,根据干热岩热储电性特征可对热储层进行圈定并计算出其体积,最后通过体积法对地热田干热岩地热资源总量进行评估(汪集旻等, 2012; Chang et al., 2014)。干热岩温度是利用体积法进行干热岩资源总量评估的关键参数,由于深部干热岩温度不能完全直接进行测量,可考虑通过电磁数据预测干热岩温度分布特征,从而计

算得到干热岩地热资源储量。

5 结论及展望

本文讨论了不同类型地热资源的常用电磁探测方法,分析了地热系统“源通储盖”在电磁成像中的电性差异,这是利用电磁法进行地热资源勘探的基础。利用电磁法对大同盆地东北部高温地热资源进行探测,识别并验证了热源、热储、盖层以及控热构造等地热关键要素,总结了各地热要素的不同电性特征。探测实例表明,电磁法在地热资源探查过程中表现出良好的适应性与有效性,可有效应用于地热资源的勘探与开发。同时,为进一步提高地热勘探精度,可利用多种地球物理手段对地热目标进行探测并相互验证,结合区域地质资料进行综合地热解释,从多方法、多角度对地热资源进行研究。

回顾电磁勘探方法在地热勘探中的应用现状,高质量电磁数据和可靠电磁成像结果的获取仍是需要进一步解决的难题,需要在以下几个方面加强研究: 1)地热电磁数据采集方面可考虑人工场与天然场信号进行同时观测,以获取更宽频带范围的电磁场数据,从而更全面地了解地热系统浅部盖层、中深部热储层及导热通道、深部热源结构信息; 2)地热电成像方面,应结合多物性参数进行联合反演,并积极探索机器学习在提升联合反演计算效率方面的方法,以便快速获取高精度电磁成像结果和建立可靠的地热地质模型; 3)地热电探测不止于反映地热田的电性结构,还可用于地热田温度场预测、地热开发监测以及地热资源评价等,研发各种关键地热属性识别技术势在必行。

Acknowledgements:

This study was supported by China Geological Survey (No. DD20190128).

参考文献:

- 岑敏,董树文,施炜,周涛发,陈龙,陈兴强. 2015. 大同盆地形成机制的构造研究[J]. 地质论评, 61(6): 1235-1247.
- 李三忠,张国伟,周立宏,赵国春,刘鑫,索艳慧,刘博,金宠,戴黎明. 2011. 中、新生代超级汇聚背景下的陆内差异变形: 华北伸展裂解和华南挤压逆冲[J]. 地学前缘, 18(3): 79-107.
- 裴发根,张小博,王绪本,吕琴音,方慧,陈德元,张健. 2021. 综合地球物理勘探在齐齐哈尔地区低温地热系统调查中的应用——以 HLD1 井为例[J]. 地球物理学进展, 36(4): 1432-1442.
- 任小庆,余鸿,罗娜宁,李超民,王启宇. 2022. CSAMT 法在福建省惠安地热勘查中的应用[J]. 现代地质, 36(2): 515-523.
- 汤井田,任政勇,周聪,张林成,原源,肖晓. 2015. 浅部频率域电磁勘探方法综述[J]. 地球物理学报, 58(8): 2681-2705.
- 唐显春,王贵玲,马岩,张代磊,刘忠,赵旭,程天君. 2020. 青海共和盆地地热资源热流机制与聚热模式[J]. 地质学报,

94(7): 2052-2065.

- 唐显春, 王贵玲, 张代磊, 马岩. 2023. 青藏高原东北缘活动构造与共和盆地高温热异常形成机制[J]. 地球学报, 44(1): 7-20.
- 田红军, 张光大, 刘光迪, 游文兵, 张应文. 2020. 黔北台隆区地热勘探中广域电磁法的应用效果[J]. 物探与化探, 44(5): 1093-1097.
- 汪集旻, 胡圣标, 庞忠和, 何丽娟, 赵平, 朱传庆, 饶松, 唐晓音, 孔彦龙, 罗璐, 李卫卫. 2012. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 30(32): 25-31.
- 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 张薇. 2020. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. 地学前缘, 27(1): 1-9.
- 王贵玲, 张薇, 梁继运, 蔺文静, 刘志明, 王婉丽. 2017. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 38(04): 449-459.
- 周文龙. 2021. 大同盆地东北部地热区电性结构探测研究[D]. 武汉: 中国地质大学(武汉).

References:

- ABDELFTTAH Y, SAILHAC P, LARNIER H, MATTHEY P D, SCHILL E. 2018. Continuous and time-lapse magnetotelluric monitoring of low volume injection at Rittershoffen geothermal project, northern Alsace-France[J]. *Geothermics*, 71: 1-11.
- ANDERSON E, JOHNSTONE R, HARVEY C, USSHER G. 2000. Understanding the resistivities observed in geothermal systems[C]//World Geothermal Conference. Japan: Kyushu: 1915-1920.
- ARCHIE G E. 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics[J]. *Transactions of the Aime*, 146(1): 54-62.
- ÁRNASON K, EYSTEINSSON H, HERSIR G P. 2010. Joint 1D inversion of TEM and MT data and 3D inversion of MT data in the Hengill area, SW Iceland[J]. *Geothermics*, 39(1): 13-34.
- ARS J-M, TARITS P, HAUTOT S, BELLANGER M, COUTANT O, MAIA M. 2019. Joint inversion of gravity and surface wave data constrained by magnetotelluric: Application to deep geothermal exploration of crustal fault zone in felsic basement[J]. *Geothermics*, 80: 56-68.
- BERKTOLD A. 1983. Electromagnetic studies in geothermal regions[J]. *Geophysical Surveys*, 6(1-2): 173-200.
- CAMPBELL R B, BOWER C A, RICHARDS L A. 1949. Change of electrical conductivity with temperature and the relation of osmotic pressure to electrical conductivity and ion concentration for soil extracts[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 13(C): 66-69.
- CEN Min, DONG Shu-wen, SHI Wei, ZHOU Tao-fa, CHEN Long, CHEN Xing-qiang. 2015. Structural analysis on the formation mechanism of Datong Basin[J]. *Geological Review*, 61(6): 1235-1247(in Chinese with English abstract).
- CHANG Ping-yu, LO Wei, SONG Seng-rong, HO Kong-ruei, WU Chia-shan, CHEN Chow-son, LAI Yu-chi, CHEN Huei-fen, LU Hseuh-yu. 2014. Evaluating the Chingshui geothermal reservoir in northeast Taiwan with a 3D integrated geophysical visualization model[J]. *Geothermics*, 50: 91-100.
- DIDANA Y L, HEINSON G, THIEL S, KRIEGER L. 2017. Magnetotelluric monitoring of permeability enhancement at enhanced geothermal system project[J]. *Geothermics*, 66: 23-38.
- EGBERT G D, BOOKER J R. 1986. Robust estimation of geomagnetic transfer functions[J]. *Geophysical Journal International*, 87(1): 173-194.
- FLÓVENZ Ó G, GEORGSSON L S, ÁRNASON K. 1985. Resistivity structure of the upper crust in Iceland[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 90(B12): 10136-10150.
- GAMBLE T D, GOUBAU W M, CLARKE J. 1979. Magnetotellurics with a remote magnetic reference[J]. *Geophysics*, 44(1): 53-68.
- GAO Ji, ZHANG Hai-jiang, ZHANG Sen-qi, CHEN Xiao-bin, CHENG Zheng-pu, JIA Xiao-feng, LI Sheng-tao, FU Lei, GAO Lei, XIN Hai-liang. 2018. Three-dimensional magnetotelluric imaging of the geothermal system beneath the Gonghe Basin, Northeast Tibetan Plateau[J]. *Geothermics*, 76: 15-25.
- HAN Q, KELBERT A, HU X. 2021. An electrical conductivity model of a coastal geothermal field in southeastern China based on 3D magnetotelluric imaging[J]. *Geophysics*, 86(4): B265-B276.
- HE Lan-fang, CHEN Ling, DOR Ji, XI Xiao-lu, ZHAO Xue-feng, CHEN Ru-jun, YAO Hong-chun. 2016. Mapping the geothermal system using AMT and MT in the Mapamyum (QP) Field, Lake Manasarovar, Southwestern Tibet[J]. *Energies*, 9(10): 855.
- HOKSTAD K, TANAVSUU-MILKEVICIENE K. 2017. Temperature prediction by multigeophysical inversion: Application to the IDDP-2 Well at Reykjanes, Iceland[J]. *GRC Transactions*, 41: 1-12.
- HUANG Guo-shu, HU Xiang-yun, CAI Jian-chao, MA Huo-lin, CHEN Bin, LIAO Chen, ZHANG Shi-hui, ZHOU Wen-long. 2022. Subsurface temperature prediction by means of the coefficient correction method of the optimal temperature: A case study in the Xiong'an New Area, China[J]. *Geophysics*, 87(4): B269-B285.
- ISHITSUKA K, KOBAYASHI Y, WATANABE N, YAMAYA Y, BJARKASON E, SUZUKI A, MOGI T, ASANUMA H, KAJIWARA T, SUGIMOTO T, SAITO R. 2021. Bayesian and neural network approaches to estimate deep temperature distribution for assessing a supercritical geothermal system: Evaluation using a numerical model[J]. *Natural Resources Research*, 30(5): 3289-3314.
- JOUSSET P, HABERLAND C, BAUER K, ARNASON K. 2011. Hengill geothermal volcanic complex (Iceland) characterized by integrated geophysical observations[J]. *Geothermics*, 40(1): 1-24.
- KELLER G V, FRISCHKNECHT F C. 1966. Electrical methods in geophysical prospecting[M]. UK: Road Research Laboratory.
- KEY K, WEISS C. 2006. Adaptive finite-element modeling using unstructured grids: The 2D magnetotelluric example[J]. *Geophysics*, 71(6): G291-G299.
- KUSKY T M, LI J. 2003. Paleoproterozoic tectonic evolution of the North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 22(4): 383-397.
- KUYUMCU Ö C, SOLAROĞLU U Z D, HALLINAN S, TURKOĞLU E, SOYER W. 2012. Interpretation of 3D Magnetotelluric (MT) surveys; basement conductors of the Menderes Massif, Western Turkey[C]//International Geophysical Conference and Oil & Gas Exhibition. Istanbul: Society of Exploration Geophysicists.
- LI San-zhong, ZHANG Guo-wei, ZHOU Li-hong, ZHAO Guo-chun, LIU Xin, SUO Yan-hui, LIU Bo, JIN Chong, DAI Li-ming. 2011. The opposite Meso-Cenozoic intracontinental deformations under the super-convergence: Rifting and extension in the North China Craton and shortening and thrusting in the South China Craton[J]. *Earth Science Frontiers*, 18(3): 1-12.

- 79-107(in Chinese with English abstract).
- LI San-zhong, ZHAO Guo-chun, DAI Li-ming, ZHOU Li-hong, LIU Xin, SUO Yan-hui, SANTOSH M. 2012. Cenozoic faulting of the Bohai Bay Basin and its bearing on the destruction of the eastern North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 47: 80-93.
- LICHORO C M, ÁRNASON K, CUMMING W. 2017. Resistivity imaging of geothermal resources in northern Kenya rift by joint 1D inversion of MT and TEM data[J]. *Geothermics*, 68: 20-32.
- MAITHYA J, FUJIMITSU Y. 2019. Analysis and interpretation of magnetotelluric data in characterization of geothermal resource in Eburru geothermal field, Kenya[J]. *Geothermics*, 81: 12-31.
- MARWAN, YANIS M, IDROES R, ISMAIL N. 2019. 2D inversion and static shift of MT and TEM data for imaging the geothermal resources of Seulawah Agam Volcano, Indonesia[J]. *International Journal of GEOMATE*, 17(62): 173-180.
- MEJU M A. 2002. Geoelectromagnetic exploration for natural resources: Models, case studies and challenges[J]. *Surveys in Geophysics*, 23(2): 133-206.
- MONTECINOS-CUADROS D, DÍAZ D, YOGESHWAR P, MUNOZ-SAEZ C. 2021. Characterization of the shallow structure of El Tatio geothermal field in the Central Andes, Chile using transient electromagnetics[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 412: 107198.
- MUÑOZ G. 2014. Exploring for geothermal resources with electromagnetic methods[J]. *Surveys in Geophysics*, 35(1): 101-122.
- PEACOCK J R, THIEL S, REID P, HEINSON G. 2012. Magnetotelluric monitoring of a fluid injection: Example from an enhanced geothermal system[J]. *Geophysical Research Letters*, 39(18): L18403.
- PEI Fa-gen, ZHANG Xiao-bo, WANG Xu-ben, LÜ Qin-yin, FANG Hui, CHEN De-yuan, ZHANG Jian. 2021. Application in geothermal survey of low temperature system by integrated geophysical exploration in the Qiqihar area: take the well HLD1 as an example[J]. *Progress in Geophysics*, 36(4): 1432-1442(in Chinese with English abstract).
- REN Xiao-qing, YU Hong, LUO Na-ning, LI Chao-min, WANG Qi-yu. 2022. Application of CSAMT in geothermal exploration in Hui'an, Fujian Province[J]. *Geoscience*, 36(2): 515-523(in Chinese with English abstract).
- SANTOS F A M, AFONSO A R A, DUPIS A. 2007. 2D joint inversion of dc and scalar audio-magnetotelluric data in the evaluation of low enthalpy geothermal fields[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 4(1): 53-62.
- SOENCKONO S, REEVES R. 2017. Gravity, magnetic and resistivity investigations of the Okauia Low Temperature Geothermal System in alluvial sediments of the Hauraki Depression, New Zealand[J]. *Exploration Geophysics*, 48(3): 316-331.
- SPICHAK V, MANZELLA A. 2009. Electromagnetic sounding of geothermal zones[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 68(4): 459-478.
- SPICHAK V, ZAKHAROVA O. 2012. The subsurface temperature assessment by means of an indirect electromagnetic geothermometer[J]. *Geophysics*, 77(4): WB179-WB190.
- TANG Jing-tian, REN Zheng-yong, ZHOU Cong, ZHANG Lin-cheng, YUAN Yuan, XIAO Xiao. 2015. Frequency-domain electromagnetic methods for exploration of the shallow subsurface: A review[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 58(8): 2681-2705(in Chinese with English abstract).
- TANG Xian-chun, WANG Gui-ling, MA Yan, ZHANG Dai-lei, LIU Zhong, ZHAO Xu, CHENG Tian-jun. 2020. Geological model of heat source and accumulation for geothermal anomalies in the Gonghe basin, northeastern Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 2052-2065(in Chinese with English abstract).
- TANG Xian-chun, WANG Gui-ling, ZHANG Dai-lei, MA Yan. 2023. Coupling Mechanism of Geothermal Accumulation and the Cenozoic Active Tectonics Evolution in Gonghe Basin, Northeastern Margin of the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 44(1): 7-20(in Chinese with English abstract).
- TIAN Hong-jun, ZHANG Guang-da, LIU Guang-di, YOU Wen-bing, ZHANG Ying-wen. 2020. The application effect of the wide field electromagnetic method in geothermal exploration of Tailong area, northern Guizhou Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 44(5): 1093-1097(in Chinese with English abstract).
- WANG Gui-ling, LIU Yan-guang, ZHU Xi, ZHANG Wei. 2020. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(1): 1-9(in Chinese with English abstract).
- WANG Gui-ling, ZHANG Wei, LIANG Ji-yun, LIN Wen-jing, LIU Zhi-ming, WANG Wan-li. 2017. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 38(4): 449-459(in Chinese with English abstract).
- WANG Ji-yang, HU Sheng-biao, PANG Zhong-he, HE Li-juan, ZHAO Ping, ZHU Chuan-qing, RAO Song, TANG Xiao-yin, KONG Yan-long, LUO Lu, LI Wei-wei. 2012. Estimate of geothermal resources potential for hot dry rock in the continental area of China[J]. *Science & Technology Review*, 30(32): 25-31(in Chinese with English abstract).
- XU Shan, UNSWORTH M J, HU Xiang-yun, MOONEY W D. 2019. Magnetotelluric evidence for asymmetric simple shear extension and lithospheric thinning in South China[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 124(1): 104-124.
- YADAV K, SIRCAR A. 2019. Integrated 2D joint inversion models of gravity, magnetic, and MT for geothermal potentials: a case study from Gujarat, India[J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(3): 963-983.
- ZHANG Kun, LÜ Qing-tian, ZHAO Jin-hua, YAN Jia-yong, HU Hao, LUO Fan, FU Guang-ming, TAO Xin. 2020. Magnetotelluric evidence for the multi-microcontinental composition of eastern South China and its tectonic evolution[J]. *Scientific Reports*, 10(1): 13105.
- ZHANG Yue-qiao, MERCIER J L, VERGÉLY P. 1998. Extension in the graben systems around the Ordos (China), and its contribution to the extrusion tectonics of south China with respect to Gobi-Mongolia[J]. *Tectonophysics*, 285(1-2): 41-75.
- ZHOU Wen-long, HU Xiang-yun, YAN Shi-long, GUO Hong-dang, CHEN Wei, LIU Si-jing, MIAO Chun-yan. 2020. Genetic analysis of geothermal resources and geothermal geological characteristics in Datong Basin, Northern China[J]. *Energies*, 13(7): 1-19.
- ZHOU Wen-long. 2021. Electrical structure of geothermal area in northeast of Datong Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan)(in Chinese with English abstract).