

doi: 10.12029/gc20231115001

程正璞, 魏强, 连晟, 张海江, 胡文广, 米晓利, 雷鸣, 李戌, 于蕾. 2025. 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, 52(2): 438–451.

Cheng Zhengpu, Wei Qiang, Lian Sheng, Zhang Haijiang, Hu Wenguang, Mi Xiaoli, Lei Ming, Li Xu, Yu Lei. 2025. 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, 52(2): 438–451(in Chinese with English abstract).

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

程正璞^{1,2}, 魏强¹, 连晟¹, 张海江², 胡文广¹, 米晓利³, 雷鸣¹, 李戌¹, 于蕾¹

(1. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 天津 300309; 2. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026; 3. 中国石油集团东方地球物理公司, 河北 涿州 072751)

摘要:【研究目的】共和盆地恰卜恰地区是国内花岗岩热储型干热岩研究热点区域。本文旨在查明恰卜恰地区盖层厚度和花岗岩基底起伏形态, 分析花岗岩体的空间分布特征, 预测干热岩体的空间分布。【研究方法】本文首次将主要用于深部油气勘探的时频电磁法应用于干热岩探测, 在获取高品质原始数据的基础上, 采用数据预处理、电性参数提取、约束反演等技术, 得到了电阻率反演剖面; 采用综合解释技术, 结合已有的地质、钻孔、测井及其他物探资料, 得到了研究区地层构造、花岗岩体与干热岩体的分布特征。【研究结果】(1)时频电磁法可有效识别 10 km 以浅地层电性变化特征, 时频电磁法电阻率反演剖面整体表现为典型的 H 型电性特征(次高阻层—低阻层—高阻层), 盖层厚度呈东薄西厚, 厚 900~1400 m; 10 km 深度范围内, 整体上花岗岩电阻率随深度的增加而变大, 表现为 A 型电性特征, 顶界面埋深呈东浅西深, 为~900~2900 m。(2)结合钻孔测温资料, 预测了恰卜恰干热岩体和达连海干热岩体的空间展布特征。【结论】(1)通过对热流传导规律的分析, 认为岩体较完整的岩基和岩株是主要的热流汇聚区, 最有可能是干热岩体。(2)导致花岗岩体呈深部岩基、中部岩株、浅部岩床的分布特征。(3)花岗岩体内电阻率存在一定的差异, 在一定程度上指示了花岗岩体的完整性, 深部岩基、中部岩株较浅部岩床更加完整。

关键词: 地热发电; 时频电磁法; 花岗岩; 干热岩; 恰卜恰地区; 共和盆地; 青海省; 地热地质调查工程

创 新 点: 本文首次将时频电磁法应用于青海共和干热岩探测, 查明了恰卜恰地区盖层厚度和花岗岩基底起伏形态, 分析了花岗岩的空间分布特征, 论述了花岗岩体完整性与大地热流传导规律之间的关系, 预测了干热岩体的空间分布。

中图分类号: P631.3; P314 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2025)02-0438-14

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

收稿日期: 2023-11-15; 改回日期: 2024-02-19

基金项目: 中国地质调查局项目(DD20190131、DD20211336、DD20230018)资助。

作者简介: 程正璞, 男, 1990 年生, 博士生, 高级工程师, 主要从事电磁法数据处理解释、深部地热与油气勘查研究; E-mail: czp1990@126.com。

通信作者: 魏强, 男, 1982 年生, 高级工程师, 主要从事电磁法数据处理解释、深部地热与油气勘查研究; E-mail: xyhwei@163.com。

CHENG Zhengpu^{1,2}, WEI Qiang¹, LIAN Sheng¹, ZHANG Haijiang², HU Wenguang¹, MI Xiaoli³,
LEI Ming¹, LI Shu¹, YU Lei¹

(1. Center For Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Tianjin 300309, China; 2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China; 3. GME & Geochemical Surveys, BGP Inc., CNPC, Zhuozhou 072751, Hebei, China)

Abstract: This paper is the result of geothermal geological survey engineering.

[Objective] The Qiabuqia area within China's Gonghe Basin represents a key research zone for granite-hosted hot dry rock (HDR) systems. This study systematically investigates the caprock thickness variation and granite basement topography while elucidating the spatial configuration of granitic bodies to establish predictive models for HDR reservoir distribution. **[Methods]** Innovatively applying the Time-Frequency Electromagnetic (TFEM) method—traditionally employed in deep hydrocarbon exploration—to HDR characterization, we implemented a comprehensive workflow encompassing advanced data preprocessing, electrical parameter optimization, and constrained inversion modeling. Integrated interpretation of resistivity profiles with multi-source datasets (geological mapping, borehole logs, and auxiliary geophysical surveys) enabled three-dimensional reconstruction of stratigraphic architecture, granitic intrusion geometry, and HDR reservoir characteristics. **[Results]** (1) TFEM demonstrates exceptional capability in resolving electrical stratigraphy within 10 km depth. Resistivity profiles reveal a tripartite H-type structure comprising a sub-high-resistivity superficial layer (900–1400 m thickness, eastward-thinning), an intermediate conductive zone, and a high-resistivity basement. Granitic bodies exhibit A-type resistivity progression with depth, featuring westward-deepening top surfaces (–900 to –2900 m elevation). (2) Thermal logging-constrained models delineate distinct spatial configurations of the Qiabuqia and Dalianhai HDR reservoirs, demonstrating strong correlation with structural highs. **[Conclusions]** (1) Thermo-structural analysis identifies competent batholiths and stocks as preferential heat flow conduits, serving as prime HDR exploration targets. (2) This leads to the distribution characteristics of granitic bodies, which are deep rock bases, middle rock strains and shallow rock beds. (3) Resistivity anomalies within granitic masses reflect structural integrity gradients, with batholiths and stocks exhibiting superior mechanical continuity compared to fractured sill complexes.

Key words: geothermal power generation; time-frequency electromagnetic method; granite; hot dry rock; Qiabuqia area; Gonghe basin; Qinghai Province; geothermal geological survey engineering

Highlights: In this paper, the time-frequency electromagnetic method is applied for the first time to detect the hot dry rock in Gonghe, Qinghai Province. It identifies the overburden thickness and the undulating morphology of the granite basement in the Chabcha area, analyzes the spatial distribution characteristics of granitic rocks, discusses the relationship between the integrity of granite bodies and geothermal heat flow conduction patterns, and predicts the spatial distribution of hot dry rock reservoirs.

About the first author: CHENG Zhengpu, male, born in 1990, Ph.D. candidate, senior engineer, mainly engaged in data processing and interpretation of electromagnetic method, deep geothermics and oil-gas exploration; E-mail: czp1990@126.com.

About the corresponding author: WEI Qiang, male, born in 1982, senior engineer, mainly engaged in electromagnetic data processing and interpretation, deep geothermal and oil and gas exploration; E-mail: xyhwei@163.com.

Fund support: Supported by the projects of China Geological Survey (No.DD20190131, No.DD20211336, No.DD20230018).

1 引言

青海共和盆地位于青藏高原东北缘,是一高温地热异常盆地,区域地质活动丰富,为干热岩的形成创造了良好的条件,现今已经成为中国重要的干热岩勘探与开发示范研究区(薛建球等, 2013; 王贵玲等, 2017; 张森琦等, 2018; 许天福等, 2018; 毛翔

等, 2019)。

近年来,依托中国地质调查局、青海省国土资源厅等多个地热地质调查项目,在共和盆地及周边开展了一系列的水文地质调查、地球物理探测、水化学分析、地热测量和数值模拟工作,在地下热水分布范围与形成条件、干热岩地热资源成因机制、干热岩岩体空间展布、大地热流特征、干热岩地热

资源潜力评价等方面形成了一定认识和成果(赵振等, 2009; 孙知新等, 2011; 王斌等, 2015; 严维德, 2015; 岳高凡等, 2015; 李永革, 2016; 李林果和李百祥, 2017; 邢琮琮, 2017; 张超等, 2018; Zhang et al., 2018; Hou et al., 2018; Xu et al., 2018; 张盛生等, 2019; 张超等, 2020; 负晓瑞等, 2020; 张森琦等, 2021; 蔺文静等, 2022; 张林友等, 2025)。

恰卜恰镇位于共和盆地东北部, 共和盆地水热型与干热岩型地热地质钻探揭示出, 恰卜恰干热岩体上覆地层为早中更新世共和组、中新世咸水河组 and 上新世临夏组, 岩性以泥岩为主夹砂砾岩, 呈以段级地层为单位粗细相间的韵律性沉积, 构成相应的储盖组合, 赋存有水温 18~80℃ 的中低温地下水。总体而言, 恰卜恰干热岩体上部的新生代沉积盖层中, 泥岩等细碎屑岩厚度较大, 隔热保温性能良好, 为干热岩的二次聚热提供了有利条件。之下为温度低于 150℃ 的隐伏中晚三叠世花岗岩体, 2500 m 温度为 150℃, 进入干热岩段, 温度随深度增加而增高(张森琦等, 2018)。

以往实施的地球物理方法有大地电磁法、可控源音频大地电磁法、地面重磁、地震勘查等。张森琦等(2018)基于 1:5 万重磁和航磁测量指出恰卜恰地热区具有三套地层结构, 基底花岗岩的埋藏深度大致为 1200~1350 m, 与基于可控源音频大地电磁测深获得的基底埋深情况(1000~1400 m, 薛建球等, 2013)较为接近。张森琦等(2020, 2021)结合地质-地热地质调查、区域重力和区域航磁调查、天然地震背景噪声层析成像、大地电磁法等勘查手段, 在共和盆地及其外围地区圈定出干热岩勘查目标靶区 16 处, 其热储层均为隐伏印支期中酸性花岗岩体, 并证实了共和盆地壳内存在部分熔融层, 进而构成地处板内环境、高热流区共和盆地干热岩资源的区域性热源(薛建球等, 2013; 张森琦等, 2018, 2020, 2021)。

上述地球物理方法各有特点, 都在一定程度上解决了某些地质任务, 但也存在不足之处。如表 1 所示, 大地电磁法(MT)虽探测深度大, 但一般测点距较大、抗干扰能力差, 浅部勘探盲区大, 多用于热源机制的研究; 可控源音频大地电磁法(CSAMT)勘探深度 1~2 km, 虽能在一定程度上揭示地层结构和断裂构造, 但不能探查到更深部热储层的形态, 且靠近城镇周边抗干扰能力弱, 导致原始资料品质下降, 分辨率下降; 人工地震勘查虽能较精细查明地下深部地质结构及构造特征, 但存在能量不平衡、深层信号弱、干扰波复杂多变等问题, 且勘探成本高。

为解决常规电磁法抗干扰能力差、浅部勘探盲区大、勘探深度不足、分辨率不足及深部花岗岩反射信号弱且杂乱、花岗岩体密度横向变化不均匀等问题, 本文利用中石油东方地球物理勘探有限责任公司研发的 TFEM-T3 型大功率(200 kW)恒流时频电磁仪和 WL2C 型组网式采集站在恰卜恰地区开展时频电磁法地热勘查工作, 在前人研究基础上, 查明研究区盖层厚度和花岗岩基底顶界面, 分析花岗岩的空间分布特征, 讨论分析花岗岩体完整性与大地热流传导规律之间的关系, 结合钻孔测温曲线, 预测干热岩体的空间分布, 为深部地热资源评价、钻探提供地质依据。

2 研究区地质概况

研究区恰卜恰镇位于共和盆地塘格木坳陷与黄河隆起的过渡斜坡带处(图 1), 受山前深大断裂的控制, 挽近期构造活动强烈, 山体隆升, 盆地大幅度下降, 沉积了较厚的第四系冲洪积、河湖相堆积物和新、古近系湖相堆积物(薛建球等, 2013)。

第四系地层厚度 400~600 m, 岩性以亚黏土、亚砂土及粉细砂、中粗砂为主, 电阻率值表现为表层次高阻层, 范围约 30~80 $\Omega \cdot m$; 古近系—新近系地

表 1 多种地球物理勘探方法对比

Table 1 Comparison of various geophysical exploration methods

方法	探测深度/km	分辨率	抗干扰能力	施工效率	施工成本	适用范围
AMT	2	中	弱	高	低	中浅水热
MT	30	低	弱	低	中	深部热源机制
CSAMT	2	高	中	高	低	中浅水热
TFEM	10	高	强	高	中	中深水热或干热
人工地震	5	高	强	高	高	中深水热或干热

注: 横向分辨率为点距的二分之一; 深度不同, 纵向分辨率不同。

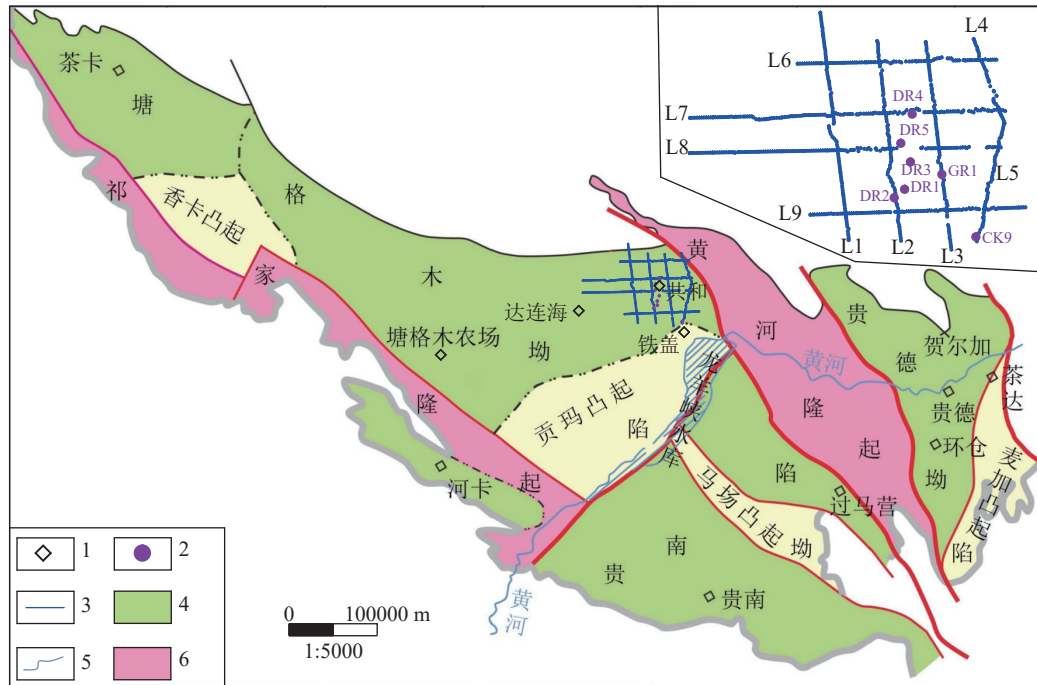


图 1 共和盆地简要构造位置及时频电磁法测线部署图(据张超等, 2018 修改)

1—地名; 2—地热钻孔; 3—测线; 4—坳陷区; 5—黄河; 6—隆起区

Fig.1 Brief structural position of Gonghe Basin and line deployment diagram of TFEM (modified from Zhang Chao et al., 2018)

1—Place name; 2—Geothermal drilling; 3—Survey line; 4—Depression area; 5—The Yellow River; 6—Uplift area

层厚度约为 500~1000 m, 上部为砖红色泥岩、砂质泥岩互层, 电阻率值最低, 范围约 8~30 $\Omega \cdot m$, 下部为褐红色砂质泥岩夹砂砾岩, 较上部粗颗粒岩石成分增多, 电阻率相对增高形成次低阻层, 范围约 20~80 $\Omega \cdot m$; 下部为不整合接触的花岗岩基底段, 侵入时代为中晚三叠世, 分为印支期早、晚两个侵入期次, 该侵入岩从基性到酸性均有发育, 主体岩性为花岗闪长岩、二长花岗岩、似斑状二长花岗岩、钾长花岗岩和似斑状钾长花岗岩, 埋藏深度为 1000~1400 m, 且由西向东逐渐变浅, 电阻率值最高, 一般大于 500 $\Omega \cdot m$; 部分地段古近系—新近系下伏为三叠系及前三叠系碎屑岩、碳酸盐岩等, 电阻率值低于花岗岩, 表现为次高阻层, 范围为 100~800 $\Omega \cdot m$ (赵振等, 2009; 薛建球等, 2013; 张森琦等, 2018)。

研究区地层电阻率总体上随地层时代由新到老表现为: 表层次高阻层—低阻层—高阻层, 为时频电磁法勘探提供了良好的物理基础。

3 工作方法

时频电磁法(TFEM)是在可控源音频大地电磁

测深法(CSAMT)和长偏移距瞬变电磁法(LOTEM)的基础上发展起来的电磁勘探法, 实现了时间域电磁法和频率域电磁法的统一, 在油气勘探中得到广泛应用(张春贺等, 2013; He et al., 2019; 何展翔等, 2020a)。

图 2 是 TFEM 勘探野外施工示意图, 施工时由发射和接收两个部分组成。图中 AB 是发射源接地电极, 与主测线基本平行, 其长度在 5~10 km, 布置地点一般选择在潮湿且远离河湖沟渠的位置, 通过多根电缆并联到 TFEM-T3 型大功率(200 kW)恒流时频电磁仪(庞恒昌和高华, 2009)向地下供电; 接收端多台 WL2C-B 型组网式采集站(穆群英等, 2017)排列接收, 布设在离发射源 5 km 以远的区域, 通过接地线 MN 测量与激发源平行的水平电场分量 E_x 和垂向磁场分量 H_z , 信号接收系统通过 GPS 与发射同步接收多个频率的重复激发信号。在相同地电条件下, 时频电磁法探测深度与发射源激发的最大周期有关, 激发周期越长探测深度越大(何展翔等, 2020b)。

由于时频电磁法采用大功率人工发射场源, 与

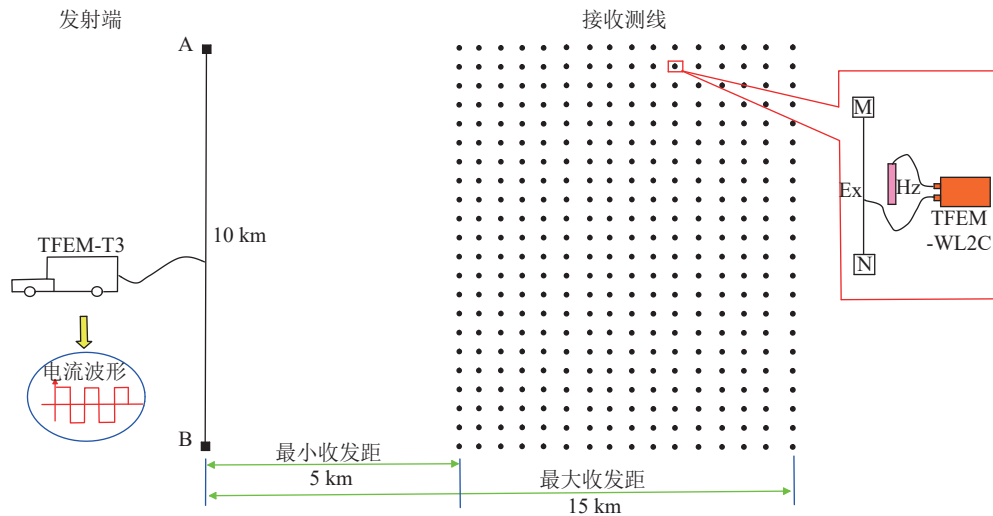


图 2 时频电磁法野外施工示意图
Fig.2 Schematic diagram of TFEM exploration field construction

天然场相比,抗干扰能力强,纵向分辨率高,无静态位移影响,资料的信噪比高,而且稳定性、重复性好,对地下电性层的反映更真实、精细,可有效地提高勘探精度。

研究区穿越共和县城,区内人文干扰众多,如公路、光伏电场、高压线、村庄、信号塔等,考虑到干热岩体勘查有别于油气勘查,时间域极化率在油气勘探中对油水界面更加敏感(石卓等,2018),但对花岗岩基底界面及内部电性不均匀的反映不如频率域电阻率敏感,故本文仅研究时频电磁法抗干扰能力更强的横向电场分量 E_x ,利用求取的频率域振幅和相位数据,开展电阻率反演工作。

4 数据采集与处理

本文依托中国地质调查项目,在恰卜恰地区布设了 9 条时频电磁法测线(图 1 蓝线所示),总长度 170 km,点距 200 m,研究区海拔整体呈北高南低、西高东低,范围为 2600~3100 m,平均海拔约 2800 m。

在数据采集过程中,严格执行《陆上可控源电

磁法勘探采集技术规程》(SY/T 6589—2016),结合研究区实际情况,本文采用了一系列的技术保障措施,获得了高品质的原始数据,如表 2 所示。

时频资料处理与解释有一套比较完善的流程(图 3),结合研究区噪音干扰情况及勘查目标特点,主要包括数据预处理、求取电性参数、电阻率约束反演、综合地质解释等方面(王志刚等,2016;何展翔等,2021;程正璞等,2023a),其中综合地质解释有别于油气勘探,主要包括地层标定、断裂解译、花岗岩体分布特征、干热岩体分布等。

5 地质解释

5.1 典型单线地层标定

本文利用研究区 DR1、DR2 和 DR3 地热钻孔资料对 L2 线电阻率反演剖面进行层位标定(图 4),刻画了 10 km 以浅的地层结构,从上至下分为“次高—低—高”3 个电性层,表现为典型的 H 型电性特征,具体如下:

第四系显示为表层次高阻层,横向连续性较好,局部电阻率略高,底界南北部较浅,中部略深,

表 2 时频电磁法数据采集针对性措施

Table 2 Targeted measures for data acquisition of time-frequency electromagnetic method		
工序名称	干扰特征	处理措施
测量工序	县城、村庄、河流、公路、光伏电厂、	合理布设测点,避开明显干扰源
发射工序	高压线、信号塔等	大功率(200 kW)建场,大电流(100 A)发射
接收工序	车辆、行人、风动干扰等	采用不极化电极罐,配对误差小于2 mV,深埋地下大于30 cm;所有线缆分段压实
现场资料预处理	坏点、异常点	分析坏点或异常点原因,及时返工

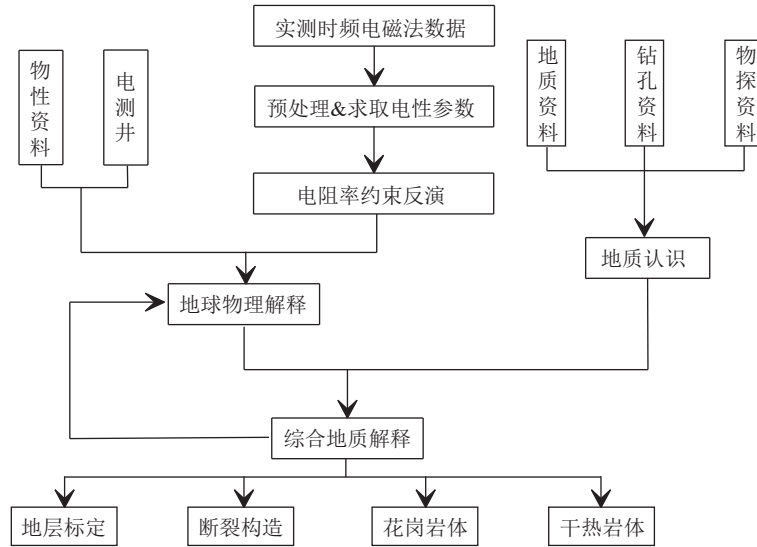


图 3 时频电磁数据综合处理解释流程

Fig.3 Flow chart of comprehensive processing and interpretation of time-frequency electromagnetic data

底界埋深海拔 2200~2400 m, 厚度 400~600 m。

新近系显示为浅层低阻层, 横向连续性较好, 底界南北两侧较浅, 中部深, 底界埋深海拔 1400~1700 m, 厚度 500~1000 m。

新近系下伏高阻层主体为印支期花岗岩基底, 整体上电阻率随深度的增加而变大, 表现为 A 型电性特征; 剖面南北两端 3000~5000 m 深度内发育的局部低阻层, 推测为三叠纪及前三叠纪碎屑岩系, 是印支期侵入岩侵入过程中残存的地质体或捕虏

体, 北端集中在 1~25 号测点间, 南端集中在 75~88 号测点间。因现有钻孔尚未钻及深部局部低阻层, 岩性解释具多解性, 也有可能是花岗岩体内部断裂构造或岩性差异的反映。

5.2 花岗岩体分布特征

根据研究区 9 条时频电磁法反演剖面结果分析, 结合电阻率等值线形态特征, 本文解释出 3 条主要断裂(图 5), 主断裂 F1 走向 NNE 向, 穿过 L6、L7、L8、L9 及 L1 测线西段, 推测为分割恰卜恰和

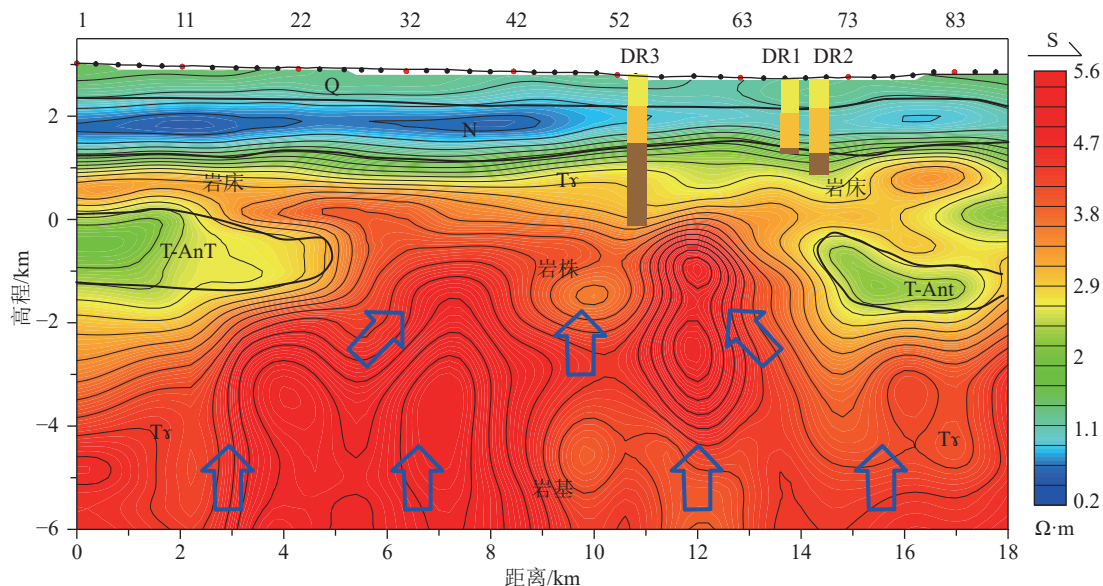


图 4 L2 线电阻率剖面标定

Fig.4 Resistivity Profile Calibration of Line L2

达连海两处花岗岩体的分界断裂。断裂 F2 和 F3 走向近东西向,二者近平行展布,均穿过 F1 主断裂。

依据 9 条时频电磁法反演剖面提取每个测点位置的花岗岩顶界面埋深,绘制恰卜恰地区花岗岩顶界面埋深海拔图(图 5),研究区花岗岩顶界面埋深整体上呈东浅西深,以 F1 断裂为界,东侧为恰卜恰花岗岩体,其顶界面埋深海拔 1000~1900 m, L3 测线与 L4、L5 测线之间区域呈南北向浅埋深条带,向西埋深趋于缓慢增加;西侧为达连海花岗岩体,其顶界面海拔埋深-100~1900 m,呈北浅南深的趋势, L1 测线北段接近青海南山,花岗岩顶界面埋深最浅; L8 测线西段花岗岩顶界面埋深最大,说明越靠近盆地内部,花岗岩上覆盖层越厚。综上,研究区花岗岩顶界面海拔埋深为-100~1900 m,考虑到研究区平均海拔为 2800 m,因此若将地表换算为 0 m,计算花岗岩顶界面埋深为-900~-2900 m。

从图 4 和图 6 中可以看出,花岗岩整体显示为高电阻率特征,但内部电阻率存在差异,剖面中段电阻率值最高,异常形态显示为柱状,推测岩浆在

深层整体侵入时存在不均一性,造成中心位置为完全侵入,外围则为部分侵入,残留有更老的围岩地层,显示为包裹残留或层状残留特征。因此,侵入岩中心位置呈现为似岩基或岩株特征,主要集中在研究区中部;浅部呈现为岩床或岩盖特征,分布在研究区外围。

6 讨 论

6.1 干热岩体分布预测

总体思路是首先通过分析花岗岩体完整性与大地热流传导规律之间的关系,预测热流汇集区域;其次根据钻孔地温标定,分析花岗岩体内的高温异常区,进而预测干热岩体的空间分布。

6.1.1 电阻率与岩体完整性关系分析

研究区花岗岩多具高电阻率特征,最高可超过 20000 $\Omega \cdot m$ 。据电阻率反演剖面(图 4,图 6)显示,花岗岩体内电阻率存在一定的差异,这与花岗岩体的完整性有关。深部岩基、中部岩株表现为较完整的高电阻率异常形态,表明岩体较完整,4 km 以浅主要分布 L2、L3 与 L7、L8、L9 测线的交点范围内;

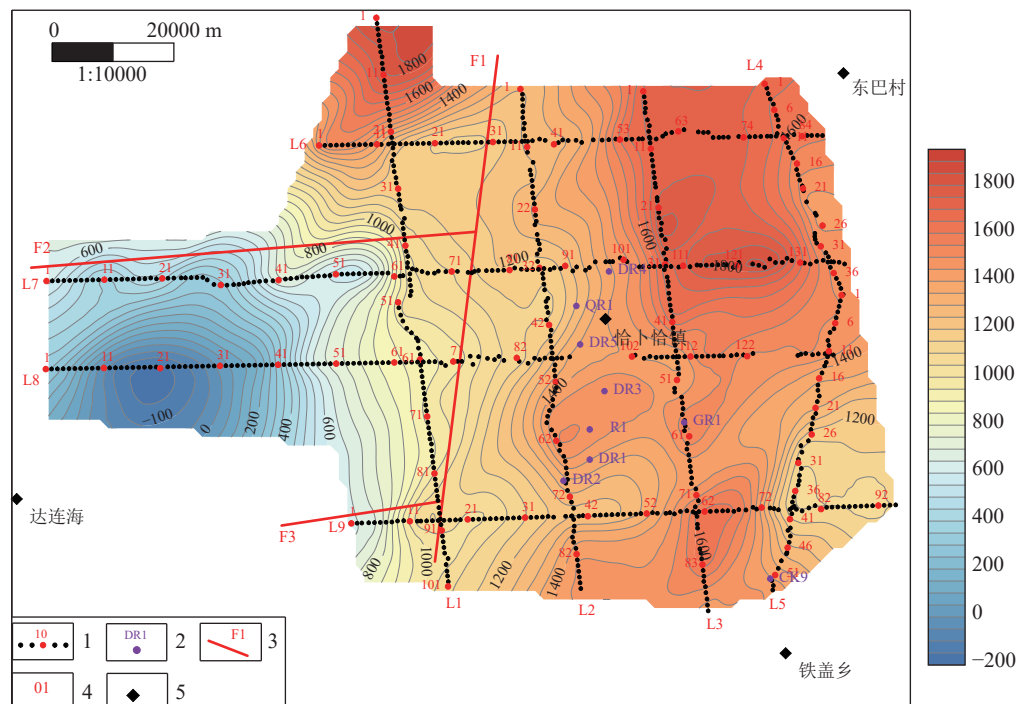


图 5 恰卜恰地区花岗岩顶界面埋深海拔图

1—测点;2—地热钻孔;3—断裂;4—测线;5—地名

Fig.5 Altitude map of buried depth of granite top surface in Qiabuqia Area
1—Measuring point; 2—Geothermal drilling; 3—Faults; 4—Survey line; 5—Place name

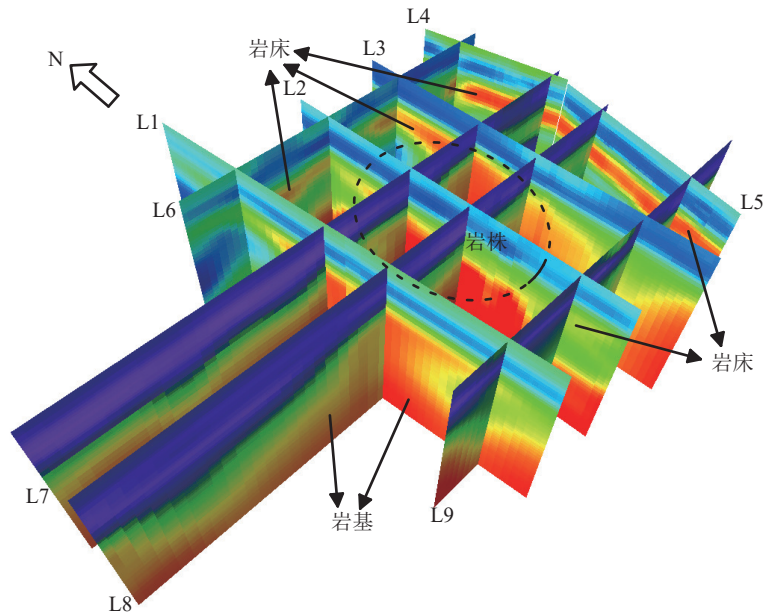


图 6 研究区 TFEM 电阻率反演剖面拟三维图

Fig.6 Pseudo-3D map of TFEM resistivity inversion profile in the study area

4 km 以深测线控制范围内花岗岩体均较完整。岩床的电阻率值较岩基、岩株低,且横向变化不均匀,表明岩体不如岩基、岩株完整,在局部区域有一定程度的破碎,主要分布在 4 km 以浅的 L1、L4、L5、L2 与 L3 测线两端。

6.1.2 热流传导规律分析

根据热流传导规律,热量一般沿导热率高的岩层向四周扩散,而岩性是决定岩层导热率的主要因素。在研究区花岗岩的导热率最高,一般情况下,花岗岩内部较完整的岩体是主要的热量传导与汇聚区域,如图 4 蓝色箭头所示,岩体较完整的岩基和岩株则成为区域热流传导的主要汇聚区,存在破碎岩体的岩床则是次级热流汇聚区,上覆第四系、新近系及外围残存的三叠系作为盖层,起到阻挡热流传导和保温的作用。相较于岩床,岩基和岩株最有可能是干热岩体。

6.1.3 干热岩边界确定

干热岩是指埋藏于地下 3~10 km、温度 150~650℃,不含或微含不流动流体的高温岩体(Brown et al., 1995)。据此,本文暂将 150℃ 作为干热岩的温度下限,以岩株或岩基电阻率异常形态为基础,结合地热孔测温资料,预测岩株或岩基区域 150℃ 温度界面/线的可能位置。

如图 7 所示, L2 测线 26 至 71 号测点间的高阻花岗岩体呈岩株状发育,表现为上隆特征; DR2 孔温度-深度关系曲线(0~1840 m 为实测值, 1840~4000 m 为推测值)显示,当深度为 3670 m 时,岩层温度已达 150℃,因此本文沿 DR2 井 3670 m 深度电阻率异常边界追踪预测了干热岩体顶界面,呈现两侧深中间浅的特征。需要说明的是,温度推测值是以 1840 m 处的曲线斜率下延得到的,由于 1840 m 已进入花岗岩段,且钻孔处 1840~4000 m 段花岗岩电阻率变化不剧烈,为方便分析,本文认为 1840~4000 m 段花岗岩内部地温梯度和导热率保持相对稳定。

如图 8 所示, L3 测线 25 至 70 号测点间的高阻花岗岩体呈岩株状发育,向北表现为上隆特征;北段 DR4 孔实测温度-深度关系曲线显示,当深度达到 2318.7 m 时,岩层温度已达 150℃;南段 GR1 孔实测温度资料显示,钻井深度 2758 m 时,岩层温度已达 150℃。因此本文沿 DR4 孔 2320 m 和 GR1 孔 2758 m 深度电阻率异常边界追踪预测了干热岩体顶界面,呈现南深北浅的特征。

考虑到研究区目前干热岩钻孔深度最深为 4000 m,因此本文将电阻率剖面上标定的干热岩体顶界线与海拔-1200 m 在平面上的交线作为干热岩体的水平切面,如图 9 和图 10 所示, F1 断裂东侧为

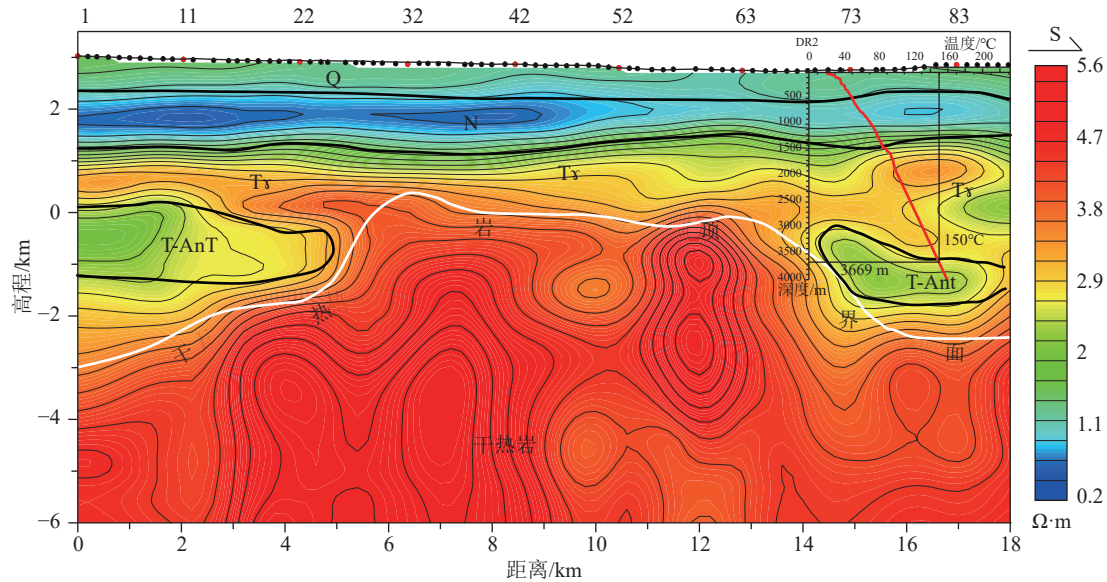


图7 基于L2测线电阻率剖面与DR2孔测温曲线的干热岩体标定图

Fig.7 Calibration diagram of HDR mass based on resistivity profile of line L2 and temperature measurement curve of hole DR2

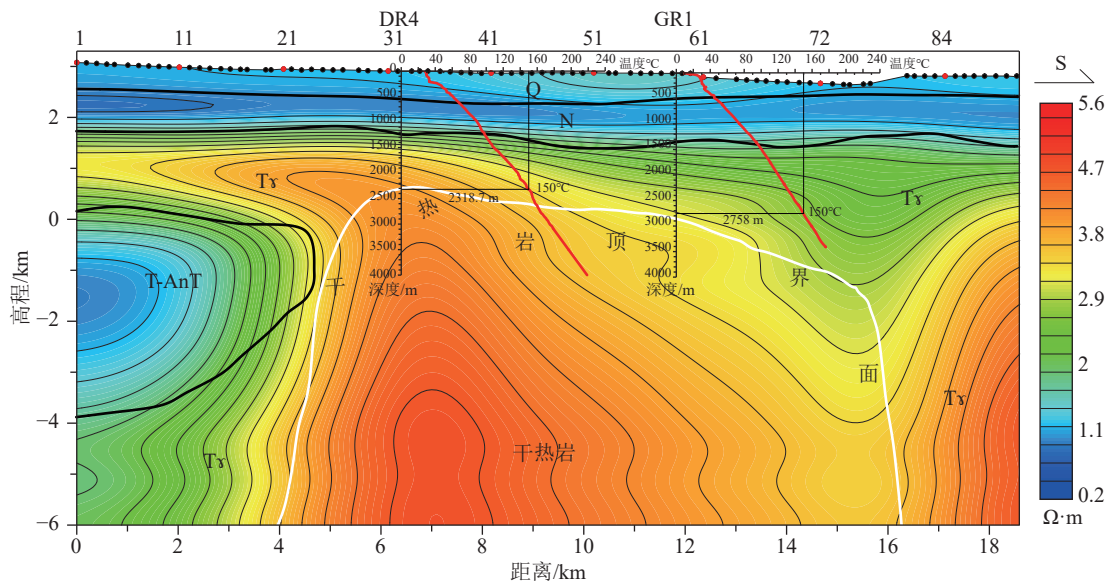


图8 基于L3测线电阻率剖面与DR4、GR1孔测温曲线的干热岩体标定图

Fig.8 Calibration diagram of HDR mass based on resistivity profile of line L3 and temperature measurement curve of hole DR4 and GR1

恰卜恰干热岩体,分布面积相对较大,主体分布于L2测线、L3测线与L7测线、L8测线和L9测线的交点范围内;推测L7测线沿线干热岩体埋深最浅,埋深海拔约为300m;南侧的DR3孔和GR1孔附近发育两处局部高点。受时频电磁法测线数量和线距所限,对F1西侧达连海干热岩体空间刻画精度相对较低,目前仅解释出一处局部高点,大致位

于L1测线与L8测线交点北西侧,后续需进一步投入勘查工作。

需要说明的是,对于干热岩体顶界面的预测,仅是基于地热孔测温值(其中部分孔的深层温度值为推测值)和电阻率值的直观匹配关系而确定的,从岩性上来讲并没有明确的分界线,因而此成果更多的是对于干热岩体分布的定性判断,其准确性需

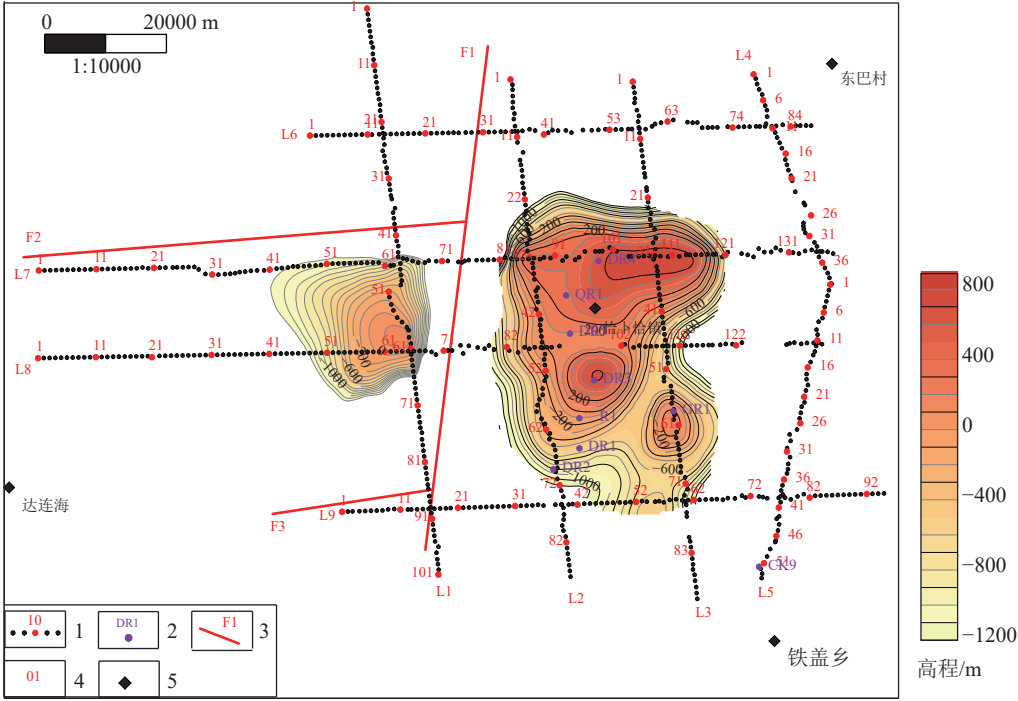


图 9 恰卜恰—达连海干热岩体平面分布预测图

1—测点; 2—地热钻孔; 3—断裂; 4—测线; 5—地名

Fig.9 Plane distribution prediction map of Qiabuqia-Dalianhai hot dry rock mass

1-Measuring point; 2-Geothermal drilling; 3-Faults; 4-Survey line; 5-Place name

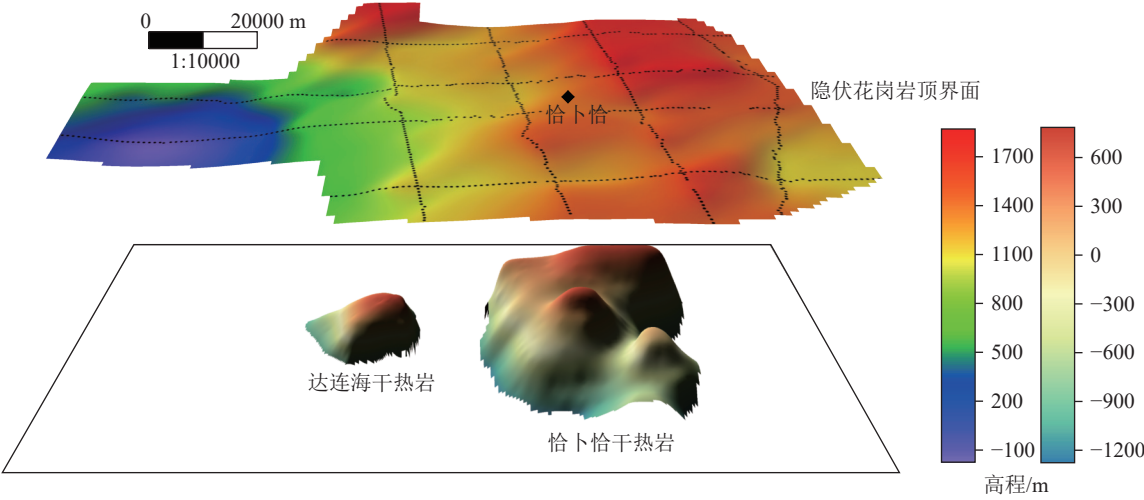


图 10 恰卜恰—达连海隐伏花岗岩/干热岩体顶界面立体显示

Fig.10 Stereo display of top surface of Qiabuqia-Dalianhai concealed granite/hot dry rock mass

要更多的干热岩勘探孔来予以验证。

6.2 时频电磁法的优势及局限性

6.2.1 优势

共和盆地地层岩性有良好的物理基础, 具备开展时频电磁法勘探的前提; 与天然场相比, 该方法

抗干扰能力强、探测深度大、资料信噪比高, 在查明地层结构、识别地下低阻体、刻画花岗岩内部电性差异等方面有独特优势。

结合地震、钻孔、测井等资料, 能够更加清晰地揭示深部地层结构、接触关系、隐伏断裂构造的走

向以及基底面起伏形态;能够查明深部花岗岩体的空间分布形态与完整性等,结合测温曲线,可以定性圈定深部干热岩体的展布范围。

时频电磁法能够弥补深部地震反射信号较弱、信噪比低的不足(王瑞贞等, 2022),解决了仅仅依靠单一的地震勘探方法难以准确刻画和表征潜山或基岩内幕地层结构的缺陷,进而为横向对比追踪预测深部热储准备了条件并提供数据支撑,在深部地热(水热型和干热型)勘探方面值得大力推广应用(程正璞等, 2023b)。

6.2.2 局限性

时频电磁法在干热岩勘查中的应用尚属于起步阶段,部分有用信号未能完全发挥作用,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。

就研究区而言,现有时频电磁法测线间距为 4~6 km,测线密度较低,对于干热岩体的空间分布特征刻画精度较低,且与达连海岩体间的接触关系不明,建议针对两个干热岩体的分布区域加密测线。

地热系统的关键要素(源、储、盖、通)分布在浅地表至地壳的不同深度,单一的电磁探测方法难以满足对整个地热系统的精细探测。因此,为综合研究地热系统从浅地表至地壳深度的分布情况,需综合考虑不同地球物理方法的探测深度与分辨率,开展多尺度多方法综合探测研究。

在后续工作中,可在研究区适时适当地补充高精度重磁和地震勘探工作,开展多尺度多地球物理场的联合反演和多属性综合解译,查明区内花岗岩发育的期次、接触关系及产状特征,进一步深化对研究区深部构造的认识,构建多尺度的干热岩地球物理-地质模型,精细刻画干热岩体空间分布。

7 结 论

(1)研究区时频电磁法电阻率反演剖面整体上从上至下分为“次高—低—高”3 个电性层,表现为典型的 H 型电性特征;利用已知钻孔资料进行层位标定,刻画了研究区 10 km 以浅的地层结构,查明了盖层厚度和花岗岩基底起伏形态,整体盖层厚度呈东薄西厚的特征,厚度 900~1400 m; 10 km 深度

范围内,花岗岩整体上电阻率随深度的增加而变大,表现为 A 型电性特征,顶界面埋深表现为东浅西深,埋深 900~2900 m。

(2)侵入岩中心位置呈现为似岩基或岩株特征,主要集中在研究区中部;浅部呈现为岩床特征,分布在研究区外围。

(3)花岗岩体内电阻率存在一定的差异,在一定程度上指示了花岗岩体的完整性。深部岩基、中部岩株表现为较完整的高电阻率异常形态,表明岩体较完整;岩床的电阻率值较岩基、岩株低,且横向变化不均匀,表明岩体不如岩基、岩株完整,在局部区域有一定程度的破碎。

(4)通过对热流传导规律的分析,认为岩体较完整的岩基和岩株则成为区域热流传导的主要汇聚区,存在破碎岩体的岩床则是次级热流汇聚区。因此相较于岩床,岩基和岩株最有可能是干热岩体。

(5)结合钻孔测温资料,预测了干热岩体的边界及空间展布特征。推测研究区干热岩主要分布 F1 断层两侧,东侧为恰卜恰干热岩体,西侧为达连海干热岩体。就目前时频电磁法测线控制范围和探测深度来看,恰卜恰干热岩规模较大,埋藏深度较浅。

致谢:在本文成稿过程中,编辑老师及匿名审稿专家提出了宝贵的修改意见,在此表示诚挚感谢!

References

- Brown D. 1995. The US hot dry rock program—20 years of experience in reservoir testing[C]// Proceedings of World Geothermal Congress, 2607–2611.
- Cheng Zhengpu, Lei Ming, Li Shu, Lian Sheng, Wei Qiang. 2023a. 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, 46(2): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Zhengpu, Lian Sheng, Wei Qiang, Hu Wenguang, Lei Ming, Li Shu. 2023b. Research on time-frequency electromagnetic method detection of Wumishan Formation thermal reservoir in deep Xiong'an New Area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 47(6): 1400–1409 (in Chinese with English abstract).
- Dong W B, Zhao X M, Liu F, Zhao G. 2008. The time frequency electromagnetic method and its application in western China[J]. Applied Geophysics, 5(2): 127–135.
- He Zhanxiang, Chen Zhongchang, Ren Wenjing, Pang Hengchang,

- Tian Zhiqian, Shen Yibin. 2020a. Time frequency electromagnetic (TFEM) method: Data acquisition system and its application[J]. Oil Geophysical Prospecting, 55(5): 1131–1138 (in Chinese with English abstract).
- He Zhanxiang, Dong Weibin, Zhao Guo, Hou Yujian, Shen Yibin, Liu Xuejun. 2021. Time–frequency electromagnetic (TFEM) technology: Data processing[J]. Oil Geophysical Prospecting, 56(6): 1391–1399 (in Chinese with English abstract).
- He Z X, Suo X D, Hu Z Z, Shi Y L, Shi D Y, Dong W B. 2019. Time frequency electromagnetic method for exploring favorable deep igneous rock targets: A case study from north Xinjiang[J]. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 24(2): 215–224.
- He Zhanxiang, Hu Zuzhi, Wang Zhigang, Zhao Yunsheng, Shen Yibin, Liu Xuejun. 2020b. Time–frequency electromagnetic (TFEM) technique: step–by–step constraint inversion based on artificial fish swarm algorithm[J]. Oil Geophysical Prospecting, 55(4): 898–905, 705 (in Chinese with English abstract).
- Hou Z Y, Xu T F, Jiang Z J, Feng B. 2018. Geochemical and isotopic characteristics of geothermal water in the Gonghe Basin of the northeast Tibetan Plateau, China[C]// Proceedings of the 43rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University.
- Li Linguo, Li Baixiang. 2017. A discussion on the heat source mechanism and geothermal system of Gonghe–Guide basin and mountain geothermal field in Qinghai Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 41(1): 29–34 (in Chinese with English abstract).
- Li Y L, Jin F M, W Q. 2016. Hydrocarbon prediction with TFEM in buried hills. Jizhong Depression. Petroleum Geophysical Exploration, 51(S): 137–143.
- Li Yongge. 2016. Hydrogeochemical Characteristics and Origin Analysis of Geothermal Water in the Qabqha Area, Gonghe Basin, Qinghai Province[D]. Nanchang: East China University of Technology, 1–86 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Wang Guiling, Zhang Shengsheng, Zhao Zhen, Xing Linxiao, GanHaonan. 2022. Hot–dry–rock heat source mechanism of Gonghe Basin on the northeast margin of Qinghai–Tibet Plateau[J]. Geothermal Energy, (3): 14–24 (in Chinese with English abstract).
- Mao Xiang, Guo Dianbin, Luo Lu, Wang Tinghao. 2019. The global development process of hot dry rock (enhanced geothermal system) and its geological background[J]. Geological Review, 65(6): 1462–1472 (in Chinese with English abstract).
- Mu Qunying, Wei Qi, Pang Hengchang, Feng Yongqiang, Zhang Qimao. 2017. System composition and functions of the TFEM network time frequency electromagnetic acquisition system[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 27(1): 67–70 (in Chinese with English abstract).
- Pang Hengchang, Gao Hua. 2009. Introduction on the high–power constant–current time–frequency electromagnetic instrument[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, (S1): 49–53 (in Chinese with English abstract).
- Shi Zhuo, Zhang Hui, Duan Tao, Zhang Peng. 2018. Investigation of oil and gas reservoir in Jizhong depression based on time–frequency electromagnetic method[J]. Global Geology, 37(2): 585–594 (in Chinese with English abstract).
- Sun Zhixin, Li Baixiang, Wang Zhilin. 2011. Exploration of the possibility of hot dry rock occurring in the Qinghai Gonghe Basin[J]. Hydrogeology Engineering Geology, 38(2): 119–124 (in Chinese with English abstract).
- Wang Bin, Li Baixiang, Ma Xinhua. 2015. Prediction of heat storage temperature and depth in exploration and evaluation of hot dry rocks in Gonghe–Guide, Qinghai[J]. Ground Water, 37(3): 28–30 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Liang Jiyun, Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli. 2017. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 38(4): 449–459 (in Chinese with English abstract).
- Wang Ruizhen, Wang Jinkuan, Yan Feng, Li Haidong, Han Li, Wu Peipei. Research on seismic exploration technology of hot dry rock in Gonghe Basin[J]. Unconventional Oil & Gas, 9(4): 9–15 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhigang, He Zhanxiang, Qin Jingcheng, Wang Zihan, Zhang Lin, Zhang Yongfu. 2016. Advances of TFEM technique and its application[J]. Oil Geophysical Prospecting, 51(S1): 144–151 (in Chinese with English abstract).
- Xing Congcong. 2017. Application of Gravity and Magnetic Data Processing in the Qiapuqia Area, Qinghai Province[D]. Changchun: Jilin University, 1–73 (in Chinese with English abstract).
- Xu Tianfu, Hu Zixu, Li Shengtao, Jiang Zhenjiao, Hou Zhaoyun, Li Fengyu, Liang Xu, Feng Bo. 2018. Enhanced geothermal system: International progress and research status of China[J]. Acta Geologica Sinica, 92(9): 1936–1947 (in Chinese with English abstract).
- Xu T F, Yuan Y L, Jia X F, Lei Y D, Li S T, Feng B, Hou Z Y, Jiang Z J. 2018. Prospects of power generation from an enhanced geothermal system by water circulation through two horizontal wells: A case study in the Gonghe Basin, Qinghai Province, China[J]. Energy, 148(1): 196–207.
- Xue Jianqiu, Gan Bin, Li Baixiang, Wang Zhilin. 2013. Geological–geophysical characteristics of enhanced geothermal systems(hot dry rocks) in gonghe–guide basin [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 37(1): 35–41 (in Chinese with English abstract).
- Yan Weide. 2015. Characteristics of Gonghe Basin hot dry rock and its utilization prospects[J]. Science & Technology Review, 33(19): 54–57 (in Chinese with English abstract).
- Yue Gaofan, Deng Xiaofei, Xing Linxiao, Lin Wenjing, Liu Feng, Liu Yanguang, Wang Guiling. 2015. Numerical simulation of hot dry rock exploitation using enhanced geothermal systems in Gonghe

- Basin[J]. Science & Technology Review, 33(19): 62–67 (in Chinese with English abstract).
- Yun Xiaorui, Chen Xijie, Cai Zhihui, He Bizhu, Zhang Shengsheng, Lei Min, Xiang Hua. 2020. Preliminary study on magmatic emplacement and crystallization conditions and deep structure of hot dry rock in the northeastern Gonghe basin, Qinghai Province[J]. Acta Petrologica Sinica, 36(10): 3171–3191 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chao, Hu Shengbiao, Song Rongcai, Zuo Yinhui, Jiang Guangzheng, Lei Yude, Zhang Shengsheng, Wang Zhuting. 2020. Genesis of the hot dry rock geothermal resources in the Gonghe basin: constraints from the radiogenic heat production rate of rocks[J]. Chinese Journal of Geophysics, 63(7): 2697–2709 (in Chinese with English abstract).
- Zhang C, Jiang G Z, Shi Y Z, Wang Z T, Wang Y, Li S T, Jia X F, Hu S B. 2018. Terrestrial heat flow and crustal thermal structure of the Gonghe–Guide area, northeastern Qinghai–Tibetan plateau[J]. Geothermics, 72: 182–192.
- Zhang Chao, Zhang Shengsheng, Li Shengtao, Jia Xiaofeng, Jiang Guangzheng, Gao Peng, Wang Yibo, Hu Shengbiao. 2018. Geothermal characteristics of the Qiabuqia geothermal area in the Gonghe basin, northeastern Tibetan Plateau[J]. Chinese Journal of Geophysics, 61(11): 4545–4557 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chunhe, Liu Xuejun, He Lanfang, He Weihui, Zhou Yinming, Zhu Yongshan, Cui Zhiwei, Kuang Xihan. 2013. A study of exploration organic rich shales using Time–Frequency Electromagnetic Method (TFEM)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 56(9): 3173–3183 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Linyou, Li Xufeng, Zhu Guilin, Zhang Shengsheng, Zhang Chao, Wang Huang, Feng Qingda, Xu Wenghao, Niu Zhaoxuan, Deng Zhihui. 2025. Geothermal geological characteristics, genetic model and resource potential of hot dry rocks in Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. Geology in China, 52(2): 399–415.
- Zhang Senqi, Fu Lei, Zhang yang, Song Jian, Wang Fuchun, Huang Jinhui, Jia Xiaofeng, Li Shengtao, Zhang Linyou, Feng Qingda. 2020. Delineation of hot dry rock exploration target area in the gonghe Basin based on high–precision aeromagnetic data[J]. Natural Gas Industry, 40(9): 156–169 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Senqi, Li Xufeng, Song Jian, Wen Dongguang, Li Zhiwei, Li Dunpeng, Cheng Zhengpu, Fu Lei, Zhang Linyou, Feng Qingda, Yang Tao, Niu Zhaoxuan. 2021. Analysis on geophysical evidence for existence of partial melting layer in crust and regional heat source mechanism for hot dry rock resources of Gonghe Basin[J]. Earth Science, 46(4): 1416–1433 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Senqi, Yan Weide, Li Dunpeng, Jia Xiaofeng, Zhang Shengsheng, Li Shengtao, Fu Lei, Wu Haidong, Zeng Zhaoafa, Li Zhiwei, Mu Jianqiang, Cheng Zhengpu, Hu Lisha. 2018. Characteristics of geothermal geology of the Qiabuqia HDR in Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. Acta Geologica Sinica, 45(6): 1087–1100 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Shengsheng, Zhang Lei, Tian Chengcheng, Cai Jingshou, Tang Baochun. 2019. Occurrence geological characteristics and development potential of hot dry rocks in Qinghai Gonghe basin[J]. Journal of Geomechanics, 25(4): 501–508 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Zhen, Chen Huijuan, Ma Jianqing, Liang Zhixiang. 2009. Evaluation and development of geothermal resources in the Qabcha Area, Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. Journal of Qinghai Environment, 19(2): 81–84 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 程正璞, 雷鸣, 李戌, 连晟, 魏强. 2023a. 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]. 华东地质, 46(2): 1–8.
- 程正璞, 连晟, 魏强, 胡文广, 雷鸣, 李戌. 2023b. 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, 47(6): 1400–1409.
- 何展翔, 陈忠昌, 任文静, 庞恒昌, 田志权, 沈义斌. 2020a. 时频电磁 (TFEM) 勘探技术: 数据采集系统[J]. 石油地球物理勘探, 55(5): 1131–1138.
- 何展翔, 董卫斌, 赵国, 侯宇健, 沈义斌, 刘雪军. 2021. 时频电磁 (TFEM) 技术: 数据处理[J]. 石油地球物理勘探, 56(6): 1391–1399.
- 何展翔, 胡祖志, 王志刚, 赵云生, 沈义斌, 刘雪军. 2020b. 时频电磁 (TFEM) 技术: 数据联合约束反演[J]. 石油地球物理勘探, 55(4): 898–905.
- 李林果, 李百祥. 2017. 从青海共和—贵德盆地与山地地温场特征探讨热源机制和地热系统[J]. 物探与化探, 41(1): 29–34.
- 李永革. 2016. 青海省共和盆地恰卜恰地区地下热水水文地球化学特征及成因分析[D]. 南昌: 东华理工大学, 1–86.
- 蔺文静, 王贵玲, 张盛生, 赵振, 邢林啸, 甘浩男. 2022. 青藏高原东北缘共和盆地干热岩热源机制[J]. 地热能, (3): 14–24.
- 毛翔, 国殿斌, 罗璐, 王婷灏. 2019. 世界干热岩地热资源开发进展与地质背景分析[J]. 地质论评, 65(6): 1462–1472.
- 穆群英, 魏启, 庞恒昌, 冯永强, 张启卯. 2017. TFEM 组网式时频电磁采集系统组成及功能[J]. 物探装备, 27(1): 67–70.
- 庞恒昌, 高华. 2009. 大功率恒流时频电磁仪[J]. 物探装备, (S1): 49–53.
- 石卓, 张辉, 段涛, 张鹏. 2018. 基于时频电磁法的冀中坳陷油气藏勘探调查[J]. 世界地质, 37(2): 585–594.
- 孙知新, 李百祥, 王志林. 2011. 青海共和盆地存在干热岩可能性探讨[J]. 水文地质工程地质, 38(2): 119–124.
- 王斌, 李百祥, 马新华. 2015. 青海共和—贵德干热岩勘查评价中热储温度与深度预测[J]. 地下水, 37(3): 28–30.
- 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(4): 449–459.
- 王瑞贞, 王金宽, 晏丰, 李海东, 韩力, 武佩佩. 2022. 共和盆地干热岩地震勘探技术研究[J]. 非常规油气, 9(4): 9–15.

- 王志刚, 何展翔, 覃荆城, 王子哈, 张林, 张永富. 2016. 时频电磁技术的新进展及应用效果[J]. 石油地球物理勘探, 51(S1): 144–151.
- 邢琮琮. 2017. 重磁数据处理在青海恰卜恰地区的应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 1–73.
- 许天福, 胡子旭, 李胜涛, 姜振蛟, 侯兆云, 李凤昱, 梁旭, 冯波. 2018. 增强型地热系统: 国际研究进展与我国研究现状[J]. 地质学报, 92(9): 1936–1947.
- 薛建球, 甘斌, 李百祥, 王志林. 2013. 青海共和—贵德盆地增强型地热系统(干热岩)地质—地球物理特征[J]. 物探与化探, 37(1): 35–41.
- 严维德. 2015. 共和盆地干热岩特征及利用前景[J]. 科技导报, 33(19): 54–57.
- 贡晓瑞, 陈希节, 蔡志慧, 何碧竹, 张盛生, 雷敏, 向华. 2020. 青海共和盆地东北部干热岩岩浆侵位结晶条件及深部结构初探[J]. 岩石学报, 36(10): 3171–3191.
- 岳高凡, 邓晓飞, 邢林啸, 蔺文静, 刘峰, 刘彦广, 王贵玲. 2015. 共和盆地增强型地热系统开采过程数值模拟[J]. 科技导报, 33(19): 62–67.
- 张超, 胡圣标, 宋荣彩, 左银辉, 姜光政, 雷玉德, 张盛生, 王朱亭. 2020. 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.
- 张超, 张盛生, 李胜涛, 贾小丰, 姜光政, 高棚, 王一波, 胡圣标. 2018. 共和盆地恰卜恰地热区现今地热特征[J]. 地球物理学报, 61(11): 4545–4557.
- 张春贺, 刘雪军, 何兰芳, 何委徽, 周印明, 朱永山, 崔志伟, 邝锡汉. 2013. 基于时频电磁法的富有机质页岩层系勘探研究[J]. 地球物理学报, 56(9): 3173–3183.
- 张森琦, 付雷, 张杨, 宋健, 王富春, 黄金辉, 贾小丰, 李胜涛, 张林友, 冯庆达. 2020. 基于高精度航磁数据的共和盆地干热岩勘查目标靶区圈定[J]. 天然气工业, 40(9): 156–169.
- 张森琦, 李旭峰, 宋健, 文冬光, 李志伟, 黎敦朋, 程正璞, 付雷, 张林友, 冯庆达, 杨涛, 牛兆轩. 2021. 共和盆地壳内部分熔融层存在的地球物理证据与干热岩资源区域性热源分析[J]. 地球科学, 46(4): 1416–1436.
- 张森琦, 严维德, 黎敦朋, 贾小丰, 张盛生, 李胜涛, 付雷, 吴海东, 曾昭发, 李志伟, 穆建强, 程正璞, 胡丽莎. 2018. 青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征[J]. 中国地质, 45(6): 1087–1102.
- 张盛生, 张磊, 田成成, 蔡敬寿, 唐保春. 2019. 青海共和盆地干热岩赋存地质特征及开发潜力[J]. 地质力学学报, 25(4): 501–508.
- 赵振, 陈惠娟, 马建青, 梁志祥. 2009. 青海省共和盆地恰卜恰地区地热资源评价与开发利用[J]. 青海环境, 19(2): 81–84.