

文章编号: 1001-1749(2023)03-0379-10

大地电磁测深法在太康隆起西部地热资源 勘查中的应用研究

邵炳松, 石峰, 刘志龙, 阮传侠, 朱怀亮, 邱京卫, 辛玉齐, 李鹏
(天津地热勘查开发设计院, 天津 300250)

摘要: 应用大地电磁测深法对太康隆起西部深部地层结构和隐伏断裂进行探测研究, 布设了1条NNE向大地电磁测深剖面, 获得了35个测深点。通过对大地电磁测深数据的处理、分析和反演, 获得了研究区内4000m以浅的二维电性结构模型。综合区域地质资料, 地层由上至下依次划分为第四系—新近系、三叠系、二叠系—石炭系、奥陶系—寒武系、元古界。推断了新郑—太康断裂、大隗镇断裂、郭店断裂、张庄断裂以及推断断裂F5的位置、产状等信息, 其中, 新郑—太康断裂为新郑凸起与薛店—尉氏南次凹带的分界断裂, 控制了二叠系沉积。认为研究区深部寒武—奥陶系岩溶型热储的有利区域为新郑—太康断裂附近。

关键词: 大地电磁测深; 二维反演; 太康隆起; 地热资源

中图分类号: P 631.2 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1749.2023.03.13

0 引言

地热资源作为一种绿色清洁能源, 具有再生可持续, 开发利用价值高, 社会、经济、环境效益显著等优点, 目前已广泛应用于地热发电、供暖、养殖、洗浴等方面。研究区大地构造位置属于南华北盆地的次级构造太康隆起, 前人在该区开展了多项地质、地球物理勘查等工作, 但多集中于煤炭、油气等资源的勘探与开发^[1-5]。而有关地热资源方面的调查研究工作开展较少, 现有文献资料表明仅在太康隆起商丘段和尉氏段开展过专门的地热地质调查工作。胥博文等^[6]通过在太康隆起商丘段布置的4条MT剖面, 绘制了商丘凸起基岩地质图, 并圈定了2处地热异常远景区; 任鸿飞等^[7]和刘志龙等^[8]通过在太康隆起尉氏段开展的MT和二维地震勘探工作, 分析了研究区地层、断裂展布特征, 并依据尉热1井

等周边钻井资料, 确定了研究区新近系馆陶组孔隙型热储和寒武—奥陶系岩溶型热储的地热资源勘探远景区。然而, 本文研究区在行政区划上属于航空港区, 与太康隆起商丘段和尉氏段的地热资源调查研究区所处地理位置不同, 目前航空港区未进行过专项地热资源调查研究工作, 尤其是深部岩溶型热储探查不明, 现有地质资料还不足以满足地热资源勘查开发利用需求。因此需进一步开发其地热资源, 应进行大比例尺的勘探工作, 以期后续地热资源开发利用提供有效地质依据。

深部地热资源一般埋藏深度较大, 难以被直接探测。而地球物理方法是探测地球内部构造和所储资源的有效方法, 其中, 大地电磁测深方法(magnetotelluric, MT)作为天然源电磁法, 具有勘探深度大, 不受高阻屏蔽影响, 对高导层分辨能力强等特点, 在查明基底起伏、划分断裂构造、评价地热资源

收稿日期: 2022-10-09

基金项目: 郑州市财政项目(郑财招标采购—2020—439)

第一作者: 邵炳松(1990—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事地热资源地球物理勘探的应用研究, E-mail: sdry1009@163.com。

通信作者: 石峰(1987—), 男, 工程师, 主要从事地热地球物理勘查工作, E-mail: 837878959@qq.com。

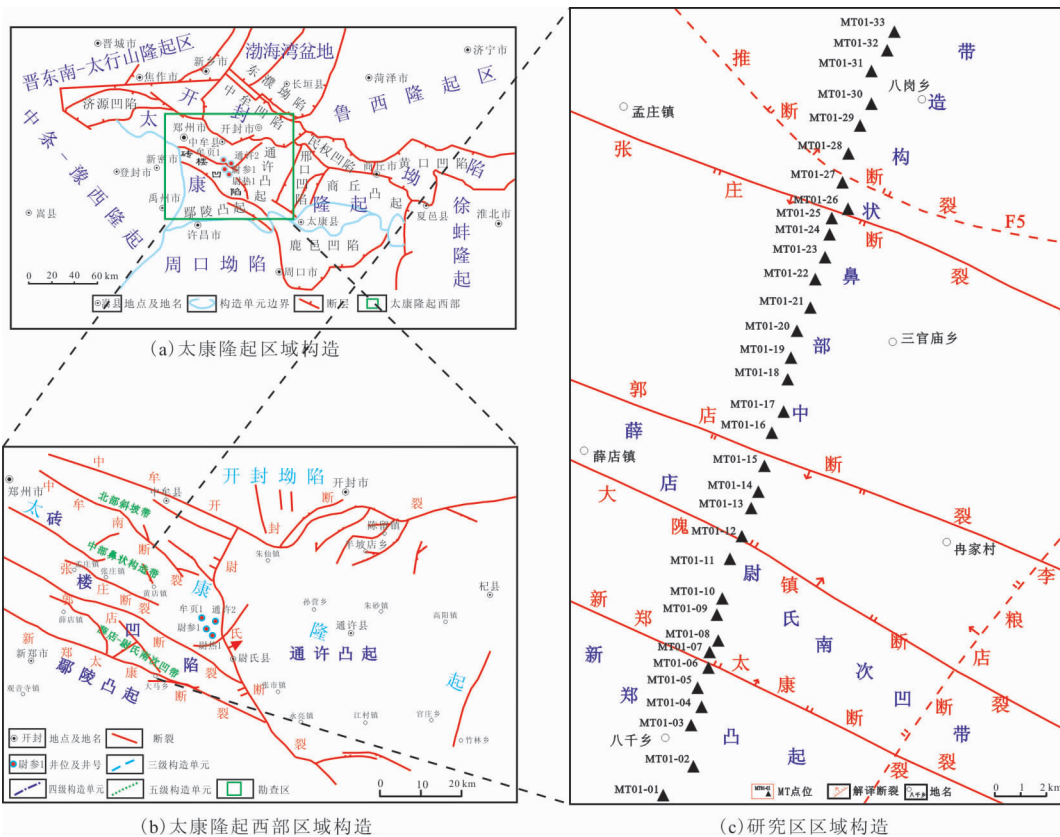


图1 研究区构造位置及 MT 实测点位图

Fig. 1 Location of tectonic background and MT measured stations of the survey area

等方面独具优势,已广泛应用于地热资源勘查等领域^[9-13]。因此,对该区域开展有关大地电磁测深方面的地热资源研究具有重要意义。这里将以在航空港区采集的 35 个大地电磁测深点为基础,经过系统的数据处理、分析、反演,获得研究区域 4 000 m 以浅的电性结构模型,并结合区域地质资料进行综合地质解释,推断地热资源远景区。

1 区域地质概况

研究区位于郑州地区东南部(航空港区),大地构造位置属于南华北盆地北部的太康隆起^[14],该隆起东接徐蚌隆起,西邻中条—豫西隆起,北与开封凹陷相邻,南接周口凹陷,整体呈 NWW 向展布,是叠加有 NNE 向短轴褶皱的宽缓复式背斜,被 NWW 向、NE 向和 NNE 向断裂切割。根据构造及地层残留特征,该隆起可进一步划分为砖楼凹陷、鄢陵凸起、通许凸起、邢口凹陷、商丘凸起等 5 个构造单元^[15-16]。研究区主要位于砖楼凹陷和鄢陵凸起(太康隆起西部),其二者又被一系列 NWW 向控制性断裂由北向南依次分割为北部斜坡带、中部鼻状构

造带、薛店—尉氏南次凹带和新郑凸起,呈“南北分区、凹凸相间”特征^[4-5]。其中,中牟—开封断裂是开封凹陷和太康隆起的边界断裂;中牟南断裂是北部斜坡带与中部鼻状构造带的分界断裂;郭店断裂是中部鼻状构造带与薛店—尉氏南次凹带的边界断裂;新郑—太康断裂是新郑凸起和薛店—尉氏南次凹带的分界断裂(如图 1)。新郑—太康断裂控制了三叠系沉积,本次研究区内的发育地层由新至老依次为:第四系(Q)、新近系(N)、三叠系(T)、二叠系(P)、石炭系(C)、奥陶系(O)、寒武系(Є)等,地层缺失严重。

2 数据采集、处理与分析

2.1 数据采集与处理

研究区大地电磁测深点分布如图 1 所示,布置 1 条 NNE 向大地电磁测深剖面(MT01),共计测深点 35 个(含检查点 2 个),剖面总长度为 29.84 km,平均点距为 1 000 m,在断裂附近点距加密至 500 m(图 1(c))。因实际地形、人文干扰等因素的影响,在满足勘查目的要求的前提下,部分测点相对设计

表 1 大地电磁测深点统计情况表

Tab. 1 Statistics table of magnetotelluric sounding points

剖面线号	剖面长度 /km	剖面方向 /°	测点个数 /个	测点质量评价					
				I 级		II 级		III 级	
				点数/个	比例/%	点数/个	比例/%	点数/个	比例/%
MT01	29.84	19	35	29	82.9	6	17.1	—	—

表 2 大地电磁测深检查点均方相对误差统计表

Tab. 2 Statistical table of mean square relative error of magnetotelluric sounding checkpoint

检查点	$\rho_{xy}/\%$	$\rho_{yx}/\%$	$\varphi_{xy}/\%$	$\varphi_{yx}/\%$	AveErr/%
MT01-23	3.79	3.95	3.92	3.05	3.68
MT01-31	2.88	3.26	3.41	2.37	2.98

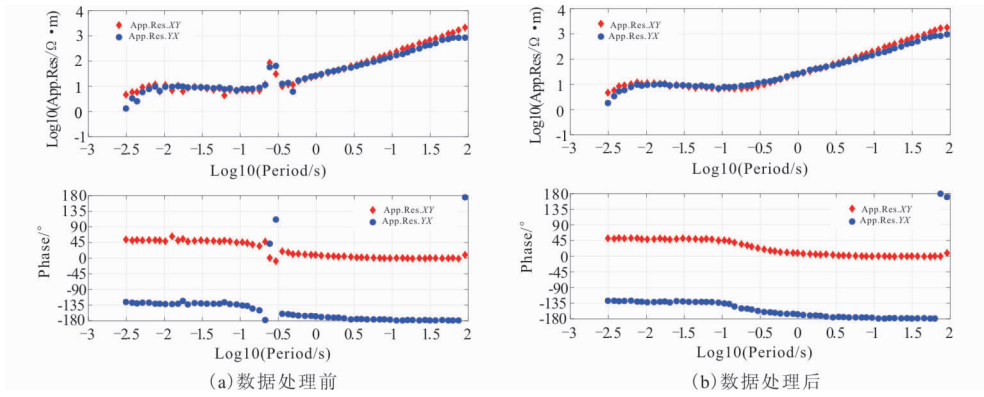


图 2 MT 数据处理前后视电阻率、相位曲线对比图(以 MT01-22 号测点为例)

Fig. 2 Comparison of apparent resistivity and phase curves before and after MT data processing (taking the measurement point MT01-22 as an example)

点位在合理范围内进行了适当偏移。MT 野外作业采用的是加拿大凤凰公司生产的 MTU-5A 型宽频大地电磁测深仪,配备 MTC-50H 型磁探头和 Pb-PbCl₂ 不极化电极,以张量观测方式采集电磁场的 4 个水平分量(E_x 、 E_y 、 H_x 、 H_y),布极采用“十”字型方式,平均电极距为 100 m。采集时间均在 3.5 h 以上,采集频率有效范围为 0.01 Hz~320 Hz,工频滤波参数设置为 50 Hz。野外观测坐标采集系统以真北向为 x 轴,正东向为 y 轴。电极点位均采用南方测绘生产的银河 Plus1 型 RTK 测量系统进行放样,精度可达厘米级,水平磁探头布设采用校准后的森林罗盘测定方向,倾斜角度不超过 1°。大地电磁测深数据质量评价及检查点均方相对误差均符合规范要求(表 1~表 2),表明野外采集数据质量满足设计要求。

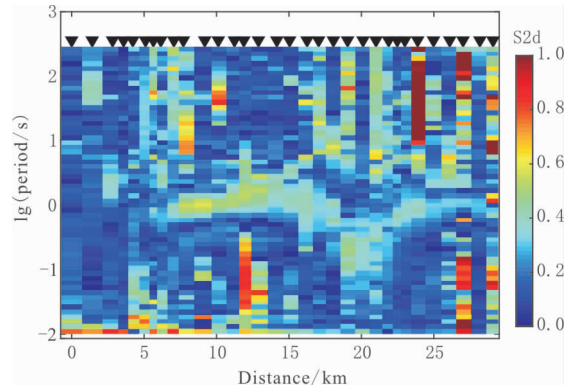


图 3 MT01 剖面 Bahr 二维偏离度拟断面图

Fig. 3 MT01 Pseudo sections of Bahr skewness along the profile

MT 数据预处理采用凤凰公司配套的 SSMT-2000 软件。首先将采集的原始时间序列经快速傅里

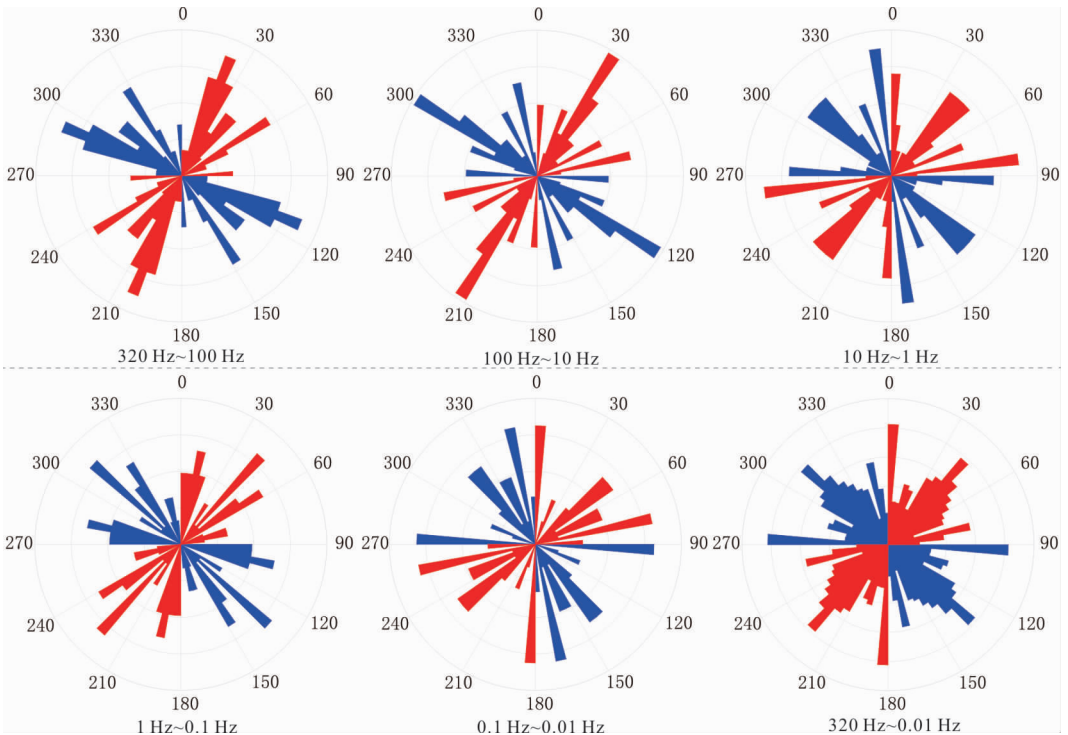


图 4 研究区所有测点不同频段 GB 分解结果

Fig. 4 GB decomposition results of different frequency bands of all measuring points in the study area

叶变换转换为与频率有关的信息;然后经过 Robust 阻抗估算^[17]获得更加真实的阻抗张量信息;再通过远参考道技术^[18],即将同步采集的 MT 测点之间互为磁道参考,以改善干扰较为严重测点的数据质量;最后用 MT-editor 软件对功率谱异常点进行挑选,校正“飞点”,以获得高质量的视电阻率和阻抗相位等数据,并导出为通用的 edi 格式数据。经一系列处理后的 MT 数据如图 2(b)所示。

2.2 维性分析

在进行反演工作之前,需要对 MT 数据进行阻抗张量分解,获得一些维性参数和电性主轴参数等。目前阻抗张量的分解方法主要有 Swift 分解^[19]、Bahr 分解^[20]等。不同的阻抗张量分解方法得到的参数不同,但都可以获得二维偏离度,以此判别 MT 数据的维性特征。Bahr 分解法在 Swift 分解法的基础上进行了改进,不易受各类畸变效应的影响,从而使分析结果更为可靠。这里主要采用 Bahr 分解法判别 MT 数据维性,通常认为二维偏离度越小,表明地下介质越接近于二维条件,如果二维偏离度值小于 0.3,则可近似为二维构造。从图 3 可以看出,MT01 剖面的大部分测点的二维偏离度值一般小于 0.3,极少数测点在部分频段的 Bahr 二维偏离度值大于 0.3,可能受畸变效应的影响。整体而言,研究区地下特征基本满足二维构造假设,适合做二维反

演。

2.3 构造走向分析

当地下电性特征满足二维构造假设时,采用 GB 分解法可以将畸变张量和区域二维阻抗张量从观测阻抗张量中分离出来,以恢复未畸变区域的二维阻抗张量^[21]。通过基于 MT 数据的多点、多频段阻抗张量分解技术,将统计结果以玫瑰图的形式显示于图 3 中。当地下介质满足二维构造假设时,一般认为两个相互垂直的电性主轴方向分别与主构造走向及其倾向基本一致。从图 4 可以看出,研究区的电性主轴方向主要在 NS0°~NE75°之间变化,电性主轴优势方向主要有 3 个,分别为 NS0°、NE45°和 NE75°,且从浅至深具有延续性,说明地下构造方向由浅至深变化不大。由于依据电性主轴推断构造走向具有 90°的不确定性,结合研究区内的断裂构造展布情况,综合认为 MT01 剖面的整体构造走向大致为 EW90°,因此在进行二维反演前需要将 MT 数据顺时针旋转 90°。

3 二维反演和电性分析

3.1 二维反演

本次大地电磁数据二维反演是采用基于 MT-pioneer 软件的二维非线性共轭梯度法(NLCG)^[22]

实现的。通过对比分析不同反演模式(TM、TE、TM+TE)、反演参数的多种反演模型,综合各模型的拟合差和粗糙度,最终选定模型的极化模式和反演参数为:TM模式,门限误差为5%,正则化因子 $\tau=7$;初始均匀半空间模型电阻率为 $100 \Omega \cdot m$;有效反演频段为 $0.01 \text{ Hz} \sim 320 \text{ Hz}$,迭代次数为100。MT01剖面最终反演拟合差为3.45。

3.2 电性结构模型分析

根据二维反演获得的电性结构模型(图5)可以看出,研究区4 000 m以浅的电性结构模型呈明显的纵向分层、横向分块特征。整体而言,浅部呈低阻特征,随着深度的增加电阻率逐渐增大。该剖面电性结构模型纵向上由浅至深可分为三层:第一电性层为浅部低阻层,底界埋深一般在700 m~1 100 m之间,电阻率值一般为 $10 \Omega \cdot m$ 左右,南薄北厚,推断为新生界;第二电性层为中部中层层,由浅至深电阻率逐渐增大,电阻率值一般在 $100 \Omega \cdot m$ 左右,其电阻率在横向上不具连续性,底界埋深一般在2 000 m~2 500 m之间,推断为中生界的反映;第三电性层为高阻层,电阻率值大于 $100 \Omega \cdot m$,顶界埋深一般超过2 000 m,推断为古生界及以下地层的反映,其中该电性层在剖面南端埋深最浅,说明该区域基岩埋深最浅,为基岩凸起区,该区段的电性反映与新郑凸起的地层特征相吻合。

4 地质解释

4.1 断裂构造解释

大地电磁测深资料判断断裂的依据主要有:①断层活动使电性层存在明显的差异或层位埋深错动明显;②断层活动导致岩石松散、破碎充填低阻介质,形成低阻异常带;③电阻率等值线出现密集带或

扭曲带^[23]。依据判断原则,结合区域地质资料,对研究区内断裂F1、F2、F3、F4和F5作了详细地解释分析。

从图6可以看出,在测点MT01-07、MT01-12、MT01-26附近存在一组明显向N倾斜的电性畸变带(F1、F2、F5断裂),断裂两侧的电性层特征存在明显差异,电性层埋深错动明显。在测点MT01-16、MT01-27号测点附近各存在一组向S倾的电性畸变带(F3、F4断裂),电性层埋深存在明显差异。其中,F1电性畸变带的规模最大,其以南区域为凸起区,基岩埋深最浅,区域上与新郑凸起一致;F1与F3电性畸变带之间形成一个凹陷区,区域上显示为薛店-尉氏南次凹带,二者之间的基岩埋深较大,其间发育有F2断裂,又将薛店-尉氏南次凹带分成两个次级断陷区;F3和F5断裂之间为一个较大规模的断凸区,其间发育有F4断裂,分别与F3、F5断裂形成次级断凸;F5断裂以北为相对凹陷区,地层由南向北倾斜,埋深逐渐增大。

依据上述断裂构造分区,综合判断认为(表3):①F1断裂为走向NWW,倾向NNE,倾角达 70° 的新郑-太康断裂,断距最大超过1 000 m,其切割深度一直从新生界延深至下古生界及以下地层,为新郑凸起与薛店-尉氏南次凹带的分界断裂;②F2断裂为走向NWW,倾向NNE,倾角 $45^\circ \sim 65^\circ$,上陡下缓,断距为200 m左右的大隗镇断裂;③F3断裂为走向NWW,倾向SSW,倾角 $55^\circ \sim 65^\circ$,断距约200 m的郭店断裂;④F4断裂为走向NWW,倾向SSW,倾角为 65° 左右的张庄断裂,断距为200 m左右,其向下延深至下古生界;⑤推断断裂F5走向NW,倾向NE,倾角较缓,为 50° 左右,断距约200 m,其切割深度一直从新生界延深至下古生界。

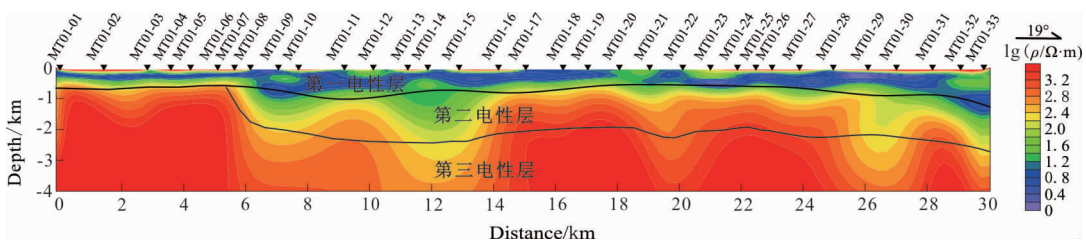


图5 MT二维反演电性结构模型

Fig. 5 Electrical structure models obtained from 2D inversion of the MT data along the profiles

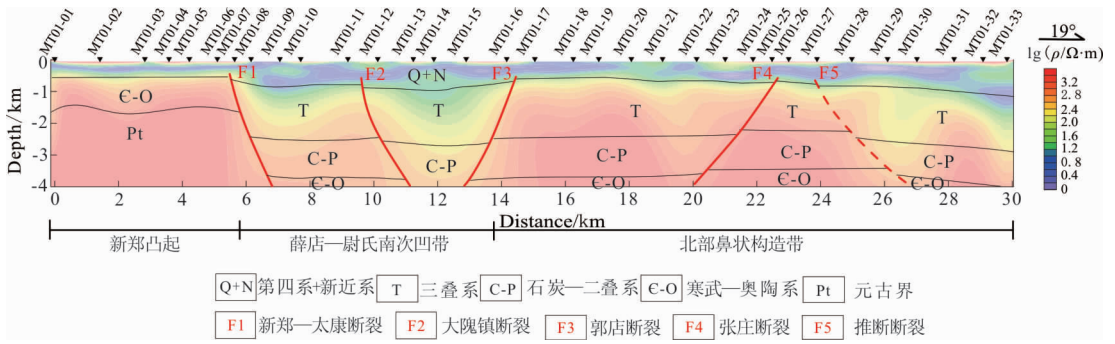


图 6 地质地球物理综合解释成果图

Fig. 6 Geological and geophysical comprehensive interpretation result map

表 3 断裂成果一览表

Tab. 3 List of fracture results

序号	断裂名称	断裂性质	产状			
			走向	倾向	倾角	断距/m
1	新郑—太康断裂	正断层	NWW	NNE	70°左右	≥1 000
2	大隗镇断裂	正断层	NWW	NNE	45°~65°	约 200
3	郭店断裂	正断层	NWW	SSW	55°~65°	约 200
4	张庄断裂	正断层	NWW	SSW	65°左右	约 200
5	推断断裂 F5	正断层	NW	NE	50°左右	约 200

表 4 地层综合解释

Tab. 4 Comprehensive interpretation of stratum

地层	岩性	电性	底界埋深/m
第四系+新近系(Q+N)	粉质粘土、细中砂、泥岩、砂岩、砾岩	低阻	700~1100
三叠系(T)	粉砂岩、细砂岩为主,夹泥岩、粉砂质泥岩	中低阻	2000~2500
石炭系—二叠系(C-P)	细砂岩、粉砂岩、泥岩、炭质泥岩夹煤层、灰黑色火山沉凝灰岩	中高阻	3500~4000
寒武系—奥陶系(C-O)	灰岩、白云质灰岩、白云岩	高阻	—

4.2 地层划分

根据研究区地层电性结构特征,结合研究区周边的尉参 1 井、通许 2 井、牟页 1 井、尉热 1 井的钻探地层结果^[4,8,24],划分地层如图 5 所示,研究区 4 000 m 以浅范围内地层由新至老发育有:新生界第四系和新近系,中生界三叠系,上古生界二叠系和石炭系,下古生界奥陶系和寒武系及元古界(如表 4)。研究区内除中生界和上古生界外,其余各套地层的电阻率值在横向上均具延续性。

1) 第四系+新近系(Q+N)。第四系地层发育齐全,岩性以粉质粘土、细中砂、粉砂为主,新近系岩

性以泥岩、粉砂岩、砂岩和砾岩为主,与第四系的电性界面并不明显,很难划分出单独一层,因此以 Q+N 表示第四系至新近系,其电阻率横向上均匀连续分布,与下伏地层存在明显的电性分界面,表现为明显的低阻特征,其值仅为 10 Ω·m 左右,地层底界埋深在 700 m~1 100 m 之间,地层起伏较为平缓。新郑—太康断裂以南区域最薄,厚度仅 700 m 左右;新郑—太康断裂和郭店断裂中间区域(薛店—尉氏南次凹带)埋深较大,可达八百余米;推断断裂 F5 以北区域埋深最大,可达千余米。

2) 三叠系(T)。该套地层岩性以粉砂岩、细砂

岩为主,夹泥岩、粉砂质泥岩,电阻率值一般为 $100 \Omega \cdot \text{m}$ 左右,呈中低阻特征,其电阻率值在横向上不具延续性,相同深度内,新郑—太康断裂两侧电阻率值呈南高北低特征,说明新郑—太康断裂南侧缺失三叠系沉积,新郑—太康断裂以北区域三叠系完整。三叠系底界埋深一般在 $2\ 000 \text{ m} \sim 2\ 500 \text{ m}$ 之间,薛店—尉氏南次凹带和推断断裂 F1 以北区域埋深最大,可达 $2\ 800 \text{ m}$ 。

3) 石炭系—二叠系(C—P)。该套地层岩性主要为细砂岩、粉砂岩、泥岩、炭质泥岩夹煤层。其中石盒子组在本次工作中新发现有大的灰黑色火山沉凝灰岩。其在新郑—太康断裂以北区域的横向电阻率分布均匀且连续,纵向上逐渐增大,一般在 $100 \Omega \cdot \text{m} \sim 1\ 000 \Omega \cdot \text{m}$ 之间,表现为中高阻特征。说明该套地层在新郑—太康断裂以北发育完整,石炭系—二叠系底界埋藏深度一般在 $3\ 500 \text{ m} \sim 4\ 000 \text{ m}$ 之间。

4) 寒武系—奥陶系(ϵ —O)。其岩性以泥质灰岩、白云质灰岩、白云岩为主,基底高阻特征明显,电阻率值一般大于 $1\ 000 \Omega \cdot \text{m}$,电阻率纵向稳定,成层性差,反映了早古生代地层。新郑—太康断裂以南区域(新郑凸起)的寒武系—奥陶系顶界埋深最浅,新近系直接与寒武系—奥陶系呈不整合接触关系,仅在 700 m 左右;其以北区域(砖楼凹陷)的寒武系—奥陶系顶界埋深最大,一般超过 $3\ 500 \text{ m}$ 。

5) 元古界(Pt)。以元古界嵩山群变质岩系为主,电阻率值最高。

4.3 地热资源远景区预测

研究目的主要是探查研究区深部寒武—奥陶系岩溶型热储的有利区域,通过研究区周边地热井实际调查及尉热 1 井的寒武系—奥陶系出水情况^[25],分析认为其周边的寒武系—奥陶系地热井基本都分布在控制性断裂构造附近,并且寒武系—奥陶系的顶界埋深一般小于 $2\ 500 \text{ m}$ 。这是因为断裂构造发育地段,岩溶、裂隙发育,富水性较好^[26]。此外,寒武系—奥陶系顶界埋深越浅,上部地层对下部寒武系—奥陶系的压实作用越弱,碳酸盐岩层孔、缝、洞越容易保存下来,越容易形成地下水的径流通道^[27]。因此综合认为区域性控制断裂和寒武系—

奥陶系顶界埋深($\leq 2\ 500 \text{ m}$)较浅区域的岩溶、裂隙较发育,具备良好的导水、导热条件,属于地热资源远景区。MT 剖面基本揭示了地层分布、断裂产状等要素,同时为了增大出水量,保证出水温度,地热钻孔位置应优先考虑在断裂上盘位置,使其能够在寒武—奥陶系热储部位钻遇断裂。

依据上述地热地质条件分析,从图 6 可以看出,勘查区内发育规模较大的断裂分别为新郑—太康断裂、大隗镇断裂、郭店断裂、张庄断裂和推断断裂 F5。新郑—太康断裂以南区域(新郑凸起)的寒武系—奥陶系底界埋深在 $1\ 800 \text{ m}$ 左右,岩溶裂隙较为发育;新郑—太康断裂和郭店断裂之间区域(薛店—尉氏南次凹带)的寒武系—奥陶系顶界埋深较大,一般超过 $3\ 500 \text{ m}$,其在大隗镇断裂和郭店断裂之间区域甚至超过 $4\ 000 \text{ m}$,上覆地层对寒武系—奥陶系的压实作用较强,碳酸盐岩的岩溶裂隙发育可能较差,不具备形成地热资源的良好条件;郭店断裂和张庄断裂之间形成的梯级断凸内的寒武系—奥陶系顶界埋深由南向北逐渐减小,但其埋深也超过 $3\ 500 \text{ m}$,同样不具备成储条件;张庄断裂和推断断裂 F5 之间次级断凸部位的寒武系—奥陶系顶界埋深也在 $3\ 500 \text{ m}$ 左右,并且在该区域布置钻孔无法在目的层钻遇断裂,不能保证出水量;推断断裂 F5 以北区域的寒武系—奥陶系顶界埋深较大,一般超过 $3\ 500 \text{ m}$,成井风险较高,因此该区域也不具备良好的成储条件。

综合分析钻遇断裂和寒武系—奥陶系埋深情况,认为新郑—太康断裂上盘位置附近为地热资源远景区,可以达到在寒武系—奥陶系热储层内钻遇断裂的目的,以增加出水温度,保证出水量。

5 结论

通过大地电磁勘探成果,综合以往区域地质资料分析,获得了研究区 $4\ 000 \text{ m}$ 以浅的电性结构模型,不但划分了研究区深部地层结构,还推断了主干断裂的位置、产状等信息,并且为地热资源远景区预测提供了大地电磁方面的证据。总结认识如下:

1) 研究区二维电性结构模型具有纵向分层、横

向分块特征,由浅至深电性层表现为低阻—中阻—高阻特征,划分的地层由新至老依次为第四系—新近系、三叠系、二叠系—石炭系、奥陶系—寒武系、元古界。其中新郑凸起基岩埋深最浅,缺失三叠系沉积,砖楼凹陷基岩埋深最大。新生界厚度一般在700 m~1 100 m之间,地层起伏较平缓;新郑凸起的寒武系—奥陶系的顶界埋深在700 m左右,砖楼凹陷的寒武系—奥陶系顶界埋深一般大于3 500 m左右。

2)MT01剖面所经区域主要发育5条断裂,由南向北依次为新郑—太康断裂、大隗镇断裂、郭店断裂、张庄断裂和推断断裂F5。其中新郑—太康断裂规模最大,断距超过1 000 m,控制三叠系沉积。

3)研究区横跨鄢陵凸起和砖楼凹陷两个构造单元,寒武系—奥陶系埋深变化大。基于MT01剖面综合分析认为新郑—太康断裂上盘区域的寒武系—奥陶系成储条件较好,为地热资源远景区。

参考文献:

[1] 李文勇,夏斌,路文芬.河南省东部地球物理特征与找煤远景[J].物探与化探,2004,28(01):26-31.
LI W Y, XIA B, LU W F. Geophysical characteristics and coal-searching prospects in east Henan area [J]. Geophysical And Geochemical Exploration, 2004, 28 (01):26-31. (In Chinese)

[2] 孙炳兴.南华北盆地太康隆起煤系页岩气地质特征及勘探潜力[J].中国煤炭地质,2021,33(02):35-40.
SUN B X. Coal measures shale gas geological features and exploration potential in Taikang uplift, southern North China basin [J]. Coal Geology of China, 2021, 33 (02):35-40. (In Chinese)

[3] 张忠民,李春生,龙胜祥,等.华北地区东部上古生界天然气勘探前景[J].天然气地球科学,2006(03):330-334.
ZHANG Z M, LI C S, LONG S X, et al. Exploration prospect of upper palaeozoic natural gas in eastern area of north China [J]. Natural Gas Geoscience, 2006(03): 330-334. (In Chinese)

[4] 张交东,曾秋楠,周新桂,等.南华北盆地太康隆起西部新区上古生界天然气成藏条件与钻探发现[J].天然气地球科学,2017,28(11):1637-1649.
ZHANG J D, ZENG Q N, ZHOU X G, et al. Drilling achievements and gas accumulation in the Upper Paleo-

zoic in western new area of Taikang Uplift, Southern North China basin [J]. Gas Geoscience, 2017, 28(11): 1637-1649. (In Chinese)

[5] 曾秋楠,张交东,于炳松,等.南华北盆地尉参1井上古生界海陆交互相页岩地球化学及其含气特征[J].海相油气地质,2019,24(01):71-77.
ZENG Q N, ZHANG J D, YU B S, et al. Geochemical characteristics and gas-bearing property of paralic transitional shale of the Upper Paleozoic in well Weican 1, southern North China basin [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2019, 24(01):71-77. (In Chinese)

[6] 胥博文,朱怀亮,石峰,等.太康隆起东段地热资源远景区调查评价与研究[J].物探化探计算技术,2019,41(4):476-484.
XU B W, ZHU H L, SHI F, et al. Investigation and evaluation of the geothermal resources prospective areas in Eastern region of Taikang uplift [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 41(4):476-484. (In Chinese)

[7] 任鸿飞,梁芳敏,王少辉,等.MT和二维地震在尉氏地热探采结合井井位布置中的应用[J].矿产勘查,2019,10(03):606-614.
REN H F, LIANG F M, WANG S H, et al. Application of MT and 2D seismic in the decomposition of Weishi geothermal exploration and mining [J]. Mineral Exploration, 2019, 10(03):606-614. (In Chinese)

[8] 刘志龙,朱怀亮,胥博文,等.河南尉氏县西部地质地球物理综合解译及地热资源远景区预测[J].地质论评,2020,66(05):1446-1456.
LIU Z L, ZHU H L, XU B W, et al. Comprehensive geological and geophysical interpretation and geothermal resources prospection of western Weishi county, Henan province [J]. Geological Review, 2020, 66(05):1446-1456. (In Chinese)

[9] 汪琪,赵志鹏,尹秉喜,等.电磁测深MT法在平原深部地热调查中的应用[J].工程地球物理学报,2016,13(6):782-787.
WANG Q, ZHAO Z P, YIN B X, et al. The Application of Magnetotelluric sounding (MT) method to deep geothermal investigation in plain [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2016, 13(6):782-787. (In Chinese)

[10] 陈大磊,郭朋,刘晨成,等.大地电磁测深(MT)与土壤氦气测量在涡阳地区地热勘查中的应用[J].山东国土资源,2016,32(10):61-64.

- CHEN D L, GUO P, LIU C C, et al. Application of magnetotelluric Sounding (MT) and the soil radon measurement in geothermal exploration in guoyang area[J]. Shandong Land and Resources, 2016, 32(10): 61 - 64. (In Chinese)
- [11] 杨学明, 雷清, 聂冀强, 等. 太行拱断束地热资源调查评价—基于大地电磁测深结果的分析[J]. 西北地质, 2020, 53(4): 235 - 245.
- YANG X M, LEI Q, NIE J Q, et al. Investigation and evaluation of geothermal resources of Taihang arch fault cluster based on the magnetotelluric exploration [J]. Northwest Geology, 2020, 53(4): 235 - 245. (In Chinese)
- [12] 曹学刚, 程国强, 李龙亮. MT 法在银川平原黄河东岸地热资源调查评价中的应用[J]. 西部探矿工程, 2021, 33(01): 141 - 144.
- CAO X G, CHENG G Q, LI L L. Application of MT method in the investigation and evaluation of geothermal resources on the east bank of the Yellow river in Yinchuan plain[J]. West-china Exploration Engineering, 2021, 33(01): 141 - 144. (In Chinese)
- [13] 邵炳松, 朱怀亮, 胡志明, 等. 济源—开封坳陷西南部电性结构研究及地热资源远景区预测[J]. 地质与勘探, 2021, 57(03): 572 - 583.
- SHAO B S, ZHU H L, HU Z M, et al. Study on electrical structure and forecast of geothermal resources prospective areas in southwest region of Jiyuan - Kaifeng depression[J]. Geology and Exploration, 2021, 57(03): 572 - 583. (In Chinese)
- [14] 徐汉林, 赵宗举, 杨以宁, 等. 2003. 南华北盆地构造格局及构造样式[J]. 地球学报, 24(01): 27 - 33.
- XU H L, ZHAO Z J, YANG Y N, et al. 2003. Structural pattern and structural style of the southern North China basin[J]. Acta Geoscientia Sinica, 24(01): 27 - 33. (In Chinese)
- [15] 孙自明. 太康隆起构造演化史与勘探远景[J]. 石油勘探与开发, 1996, 23(05): 6 - 10 + 81.
- SUN Z M. Tectonic evolution and petroleum exploration prospective of Taikang uplift [J]. Petroleum Exploration and Development, 1996, 23(05): 6 - 10 + 81. (In Chinese)
- [16] 赵东力, 赵修军, 郑琳, 等. 通许隆起构造演化史与找煤远景[J]. 地质与资源, 2008, 17(02): 132 - 134 + 157.
- ZHAO D L, ZHAO X J, ZHENG L, et al. Tectonic evolution and coal-searching prospect of Tongxu uplift [J]. Geology and Resources, 2008, 17(02): 132 - 134 + 157. (In Chinese)
- [17] EGBET G D, BOOK J R. Robust estimation of geomagnetic transfer functions[J]. Geophysical Journal International, 1986, 87(1): 173 - 194.
- [18] GAMBLE T D, GOUBAU W M, CLARKE J. Magnetotellurics with a remotemagnetic reference [J]. Geophysics, 1979, 44(1): 53 - 68.
- [19] SWIFT C M. A magnetotelluric investigation of an electrical conductivity anomaly in the southwestern United States [D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1967: 13 - 68.
- [20] BAHR K. Geological noise in magnetotelluric data: a classification of distortion types[J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 1991, 66(1-2): 24 - 38.
- [21] 柳建新, 童孝忠, 郭荣文, 等. 大地电磁测深法勘探—资料处理、反演与解释[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- LIU J X, TONG X Z, GIO R W, et al. Magnetotelluric sounding exploration - data processing, inversion and interpretation [M]. Beijing: Science Press, 2012. (In Chinese)
- [22] RODI W L, MACKIE R L. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion[J]. Geophysics, 2001, 66(1): 174 - 187.
- [23] 赵建粮, 陈天振, 张晋, 等. MT 法在开封凹陷地热资源调查中的应用[J]. 物探与化探, 2010, 34(2): 163 - 166.
- ZHAO J L, CHEN T Z, ZHANG J, et al. 2010. The application of the MT method to the investigation of geothermal resources in Kaifeng depression[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2010, 34(2): 163 - 166. (In Chinese)
- [24] 刘家橙, 刘家橘, 张栋, 等. 河南牟页 1 井山西组—太原组页岩含气性控制因素[J]. 地质找矿论丛, 2019, 34(02): 219 - 224.
- LIU J C, LIU J J, ZHANG D, et al. Controlling factors of shale gas content in Taiyuan and Shanxi Formations determined by data from well Mouye 1 in Henan province [J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 2019, 34(02): 219 - 224. (In Chinese)
- [25] 任鸿飞, 朱怀亮, 闫晋龙, 等. 太康隆起尉氏段地热资源勘探远景分析[J]. 矿产与地质, 2019, 33(03): 502 - 507.
- REN H F, ZHU H L, YAN J L, et al. Analysis on ex-

ploration Prospect of geothermal resources in Weishi section of Taikang Uplift [J]. Mineral Resources and Geology, 2019, 33(03): 502-507. (In Chinese)

- [26] 张海娇. 内黄隆起地下热水化学特征及其形成机制研究[J]. 地下水, 2019, 44(04): 23-25.
ZHANG H J. Study on the hydrochemical characteristics of geothermal water and its formation in Neihuang Uplift area [J]. Underground Water, 2019, 44(04): 23

-25. (In Chinese)

- [27] 江国胜. 天津市奥陶系热储层发育主控因素研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2014: 22-35.
JIANG G S. The research on the main factors controlling the development of Ordovician geothermal reservoirs in Tianjin [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2014: 22-35. (In Chinese)

Application of the magnetotelluric sounding method in the exploration of geothermal resources in the West of the Taikang uplift

SHAO Bingsong, SHI Feng, LIU Zhilong, RUAN Chuanxia,
ZHU Huailiang, QIU Jingwei, XIN Yuqi, LI Peng

(Tianjin Geothermal Exploration and Development—Designing Institute, Tianjin 300250, China)

Abstract: The magnetotelluric sounding method detects and studies the deep stratigraphic structure and concealed faults in the western part of the Taikang uplift. A total of 1 NNE—directed magnetotelluric sounding profile has been laid, and 35 sounding points have been obtained. A two—dimensional electrical structure model shallower than 4000m in the study area is obtained through the processing, analysis, and inversion of magnetotelluric—sounding data. Comprehensive regional geological data, the strata are divided into Quaternary—Neogene, Triassic, Permian— Carboniferous, Ordovician —Cambrian, and Proterozoic from top to bottom. The location and occurrence of the Xinzheng—Taikang fault F1, the Daweizhen fault F2, the Guodian fault F3, the Zhangzhuang fault F4, and the inferred fault F5 are inferred. Among them, the Xinzheng—Taikang fault is the boundary fault between the Xinzheng Uplift and the Xuedian—Weishi southern sub—sag, which controls Triassic deposits. It is considered that the promising areas of the deep Cambrian Ordovician Karst heat reservoir in the study area are near the upper plate of the Xinzheng Taikang fault.

Keywords: magnetotelluric sounding; two—dimensional inversion; Taikang uplift; geothermal resources