

doi: 10.11720/wtyht.2024.1141

张一, 刘鹏磊, 王玉敏, 等. 综合物探技术在济南北部地热勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2024, 48(1): 58–66. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1141>Zhang Y, Liu P L, Wang Y M, et al. Application of integrated geophysical exploration technology in the geothermal exploration of northern Jinan[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(1): 58–66. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1141>

综合物探技术在济南北部地热勘查中的应用

张一^{1,2}, 刘鹏磊³, 王玉敏^{1,2}, 张朋朋^{1,2}, 张超^{1,2}, 张宁^{1,2}

(1. 山东省物化探勘查院, 山东 济南 250013; 2. 山东省地质勘查工程技术研究中心, 山东 济南 250013; 3. 山东省地矿工程集团有限公司, 山东 济南 250299)

摘要: 济南地热资源极为丰富, 热储类型包括奥陶—寒武系岩溶裂隙热储、新近系—古近系碎屑岩类孔隙裂隙热储两种。本次地热勘查工作在济南北部大桥镇开展, 热储类型为奥陶—寒武系岩溶裂隙热储, 旨在通过物探剖面测量工作, 查明地层、断裂构造分布情况和热储层的埋深, 推断与控热、导热有关的断裂构造的产状及空间形态, 圈定地热井施工靶区, 优选地下水富水有利部位开展钻探验证。在资料搜集基础上, 通过开展直流电测深、可控源音频大地电磁测量及大地电磁测量工作, 对工作区断裂构造进行解释推断并对含水情况进行对比分析, 优选地热靶区有利部位施工一口地热探采结合井, 完井深度 1 532.06 m, 静水位埋深 13.03 m, 孔口水温 50.1 °C, 涌水量 132.998 m³/h, 降深 18.27 m。

关键词: 济南北部; 地热勘查; 直流电测深; 可控源音频大地电磁测量; 大地电磁测量

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2024)01-0058-09

0 引言

地热资源是一种绿色能源, 其开发利用对于推进绿色发展具有重要意义。济南北部地热田以齐河—广饶断裂为界, 南部为奥陶系灰岩裂隙岩溶热储, 深大断裂为深部大地热流上升提供了通道, 盖层为石炭、二叠、新近及第四系沉积地层^[1]。

电法和电磁法在裂隙岩溶热储地热勘查中具有重要作用。一方面, 岩石电阻率随温度的升高会降低^[2]; 另一方面, 构造运动造成岩石破碎充水, 水温升高也使得溶解能力增强, 地下水的矿化度升高, 电阻率也相应降低。两种因素综合作用下, 岩溶热储区域相对围岩会形成局部低阻异常特征^[3], 这是利用电法、电磁法进行地热勘查的地质地球物理依据。李大心等^[4]将大地电磁测深应用于地热背景评价, 对深部构造解析效果明显。杨锋杰等^[5]在地热异常区采用直流电测深和激电测深法推断隐伏地层及

断裂, 成果显著。金永念等^[6]利用重力、航磁、直流电测深方法推断隐伏断裂构造, 估算盖层、储层厚度, 最后用可控源音频大地电磁法确定钻井孔位, 实现江苏南部深部低温热水勘查的突破。阴曼宁等^[7]将直流电测深方法应用于地热勘探, 准确计算出了各电性层深度及变化特征。柳建新等^[8]综合利用重力、可控源音频大地电磁法推断地下构造, 两种方法互为补充, 弥补了自身的局限性。李百寿等^[9]利用被动式超低频电磁法准确地获得了深部岩溶裂隙地热水的分布信息。秦其明等^[10]对影响被动式超低频电磁法探测效果的因素进行了分析研究。孙知新等^[11]利用地震反射波法和可控源音频大地电磁测深对重力低异常进行查证, 推测为花岗岩引起, 认为是潜在的干热岩存在有利地段。薛建球等^[12]将 CSAMT 测量应用于贵德盆地, 弥补了重磁资料推测的缺陷, 提高了解译精度。刘振华等^[13]利用重力对基底构造平面异常的显示优点及可控源音频大地电磁测深法对剖面断裂构造的推断优点,

收稿日期: 2023-04-10; 修回日期: 2023-07-21

基金项目: 2019 年济南市自然资源和规划局项目(JNCZ(SDEH)-GK-2019-0011)

第一作者: 张一(1991-), 男, 2015 年毕业于长安大学, 主要从事地球物理勘查与研究工作。Email: 642023970@qq.com

通讯作者: 张朋朋(1986-), 男, 2008 年毕业于山东科技大学, 主要从事水工环地质、矿产地质方面的研究工作。Email: dzgczp@163.com

实现了对地热异常的立体定位与显示。马晓东等^[14]利用直流电测深结果作为约束对 CSAMT 测量结果进行解释推断,查明了深部地质构造的分布情况。左丽琼等^[15]采用重力、微动、CSAMT 三种物探方法综合解释,为钻孔布设提供了可靠的依据。刘会毅等^[16]通过重力剖面 2.5D 反演拟合结合 CSAMT 二维反演成果,实现了对控热地质构造的精确定位。陈昌昕等^[17]对常用的地热勘探方法进行了评价分析,提出多手段地热勘探的重要性。

综合分析,采用单一地球物理方法进行地热勘探往往会造成多解性,依据单一解释成果对钻孔工程布设的依据不充分。需要根据工作区实际地质情况选取合适的地球物理勘探方法进行组合勘探,不同方法相互补充,互相印证,提高解释的精度。

1 工作区概况

1.1 选区依据

搜集前人在济北开展的水文调查、地球物理调查工作(重力、磁法、地震)及钻探成果(图 1),最终选定 F_7 断裂作为地热勘查的重点构造。主要基于三点考虑:第一, F_7 断裂发育条件优越,地下水赋存条件良好。推断 F_7 断裂是一条近 SN 向的隐伏正断层,根据地震资料推断的奥陶纪灰岩顶板埋深等值线走势, F_7 断裂断距大,两侧奥陶纪灰岩形成明显的隐伏向斜背斜构造,推测深部奥陶纪灰岩裂隙发育情况良好。此外,断裂未被其他构造影响,地下水运移通道单一,地下水在深部容易聚拢。第二,热储条

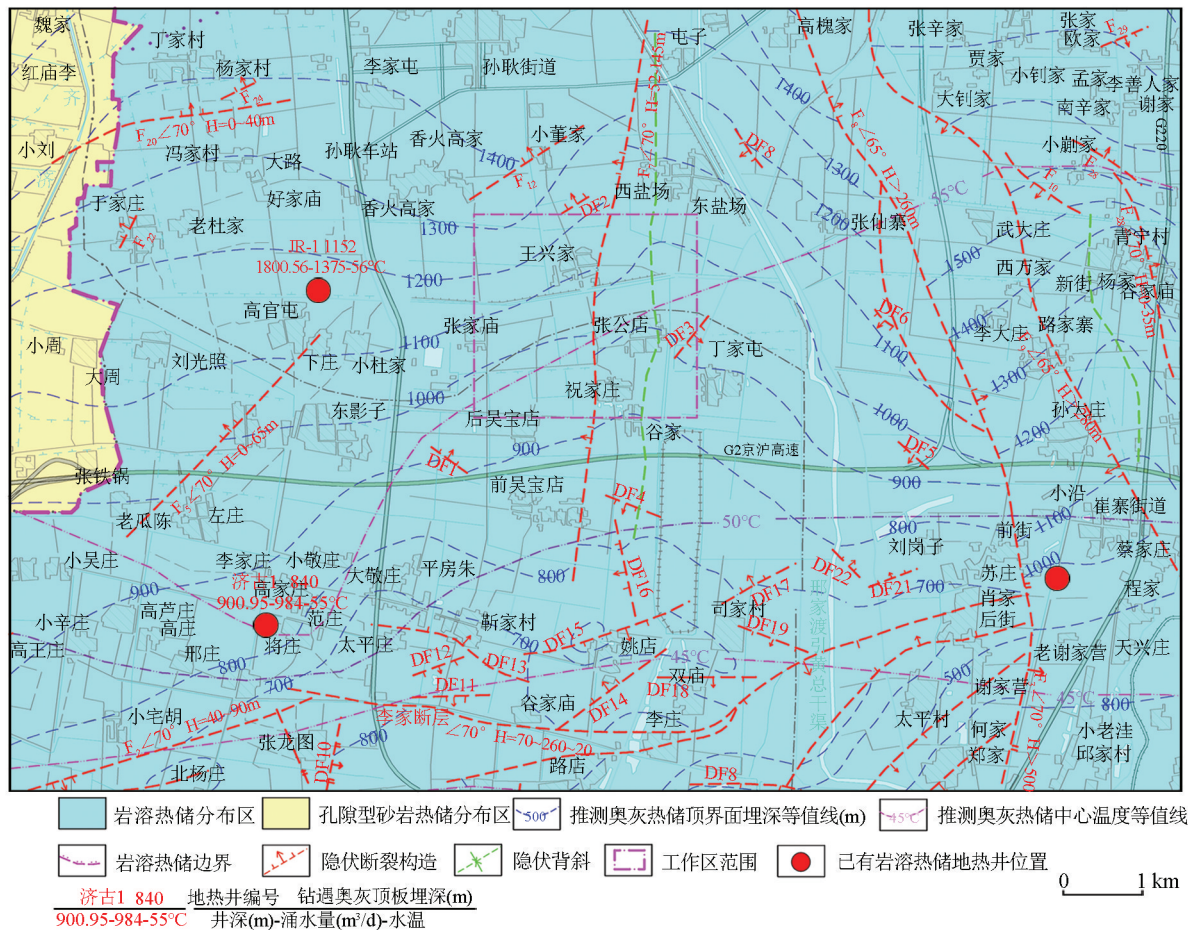


图 1 济南北部岩溶热储地热地质

Fig.1 Geothermal geological map of karst heat storage in northern Jinan

件良好。根据济北地区已施工的地热钻孔绘制了奥陶纪灰岩热储中心温度等值线,选定的工作区热储温度约为 55℃,基本满足洗浴、养殖、供暖的要求。第三,位于济南起步区特色小镇规划区,满足政府绿色发展规划的要求。

1.2 地质概况

济南北部地区为第四系覆盖,基岩未出露。

1.2.1 奥陶系(O)

地层主要为奥陶纪马家沟群,为本区深层地热资源主要赋存层位。东黄山组,岩性以灰色白云质

灰岩、白云岩为主夹少量的角砾状白云岩,地层厚度为 32.00~74.8 m。北庵庄组,岩性为灰岩夹白云岩,地层厚度为 92.97~277.40 m,与下伏地层整合接触。土峪组,岩性为泥灰岩及白云质角砾状灰岩,地层厚度为 32.18~112.21 m,与下伏北庵庄组整合接触。五阳山组,岩性以厚层灰岩、云斑灰岩为主,地层厚度约为 290 m,与下伏土峪组整合接触。阁庄组,岩性以中厚层白云岩为主,地层厚度为 29.06~76.5 m,与下伏地层整合接触。八陡组,岩性以灰岩为主,地层厚度为 81.7~136.40 m,与下伏阁庄组整合接触。

1.2.2 石炭系(C)

地层为月门沟群,为该區煤炭主要发育地层。本溪组,岩性主要为海陆交互相灰白、灰黑色砂岩、粉砂岩和黏土,夹有数层薄层海相灰岩及煤层。太原组岩性为泥岩、粉砂岩、中—细砂岩、灰岩及煤层交互发育,为典型的海陆交互型沉积。底部以一层中—细砂岩与本溪组分界。山西组下部由灰色、灰黑色中、细砂岩、粉砂岩及煤层组成,夹有粗砂岩、泥岩或黏土岩。上部由灰绿色中、细砂岩、粉砂岩、灰色泥岩及杂色黏土岩组成。

1.2.3 二叠系(P)

地层为二叠纪石盒子群,下部为陆相沉积,岩性主要为浅灰色、灰绿色、灰白色细砂岩;中部以灰色、浅灰色泥岩为主,含少量砂质;上部主要为陆相浅灰色、微灰绿色、灰绿色粉砂岩、细砂岩。

1.2.4 新近系(N)

地层为明化镇组,岩性为砂岩夹泥岩,呈交互层

状,厚度不等。区内揭露最大厚度 520 m。

1.2.5 第四系(Q)

冲洪积形成,岩性主要为粉砂、粉质黏土、粉土,局部有粗砂。

1.3 岩溶热储地热地质

先行区岩溶热储模型组成要素包括热储层、盖层、通道、热源和岩溶水滞流条件(图 2)。

1.3.1 热储层

奥陶纪、寒武纪灰岩为济北地热田主要热储层,埋藏深度由南至北自“灰岩条带”到齐河—广饶断裂埋深逐渐增大,温度逐渐升高。

1.3.2 盖层

热储层上覆巨厚的第四系、新近系、上古生界、中生界地层对深部地热起到保温作用。

1.3.3 通道

济南岩体与齐河—广饶断裂之间的几组 NNE 向、NNW 向、近 NS 向的断裂是深部热源与浅部沟通的通道,加热后的深部地下水通过这一通道到达浅部。

1.3.4 热源

热量由大地热流和断裂的附加供热提供。大地热流包括上地幔热流和放射性元素衰变释放的地壳热流两部分。附加热流则由区域内沟通深部的断裂提供。

1.3.5 岩溶水滞流条件

济南南部山区的大气降水渗入地下后,向北流淌过程中受“济南岩体”阻挡,一部分通过岩石中发育的裂隙以泉水的形式流出;另一部分绕过

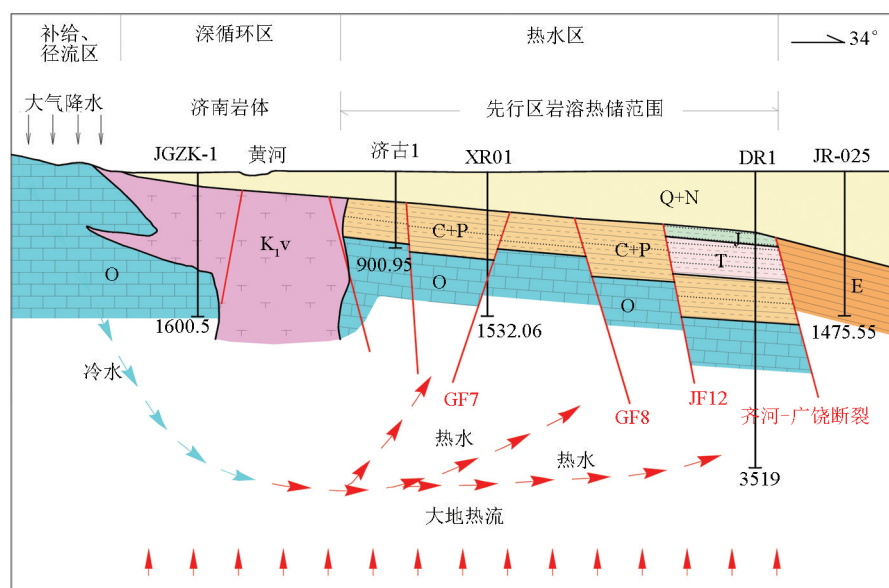


图 2 济南北部岩溶热储概念模型

Fig. 2 Conceptual model of karst heat storage in northern Jinan

“济南岩体”,流向深部经加热后,沿断裂上涌至浅部,通过钻孔揭露涌出地表,形成浅部的地热异常。

1.4 岩石物性特征

根据表 1 统计数据,该区奥陶纪灰岩电阻率一般在 3 000~4 000 $\Omega \cdot \text{m}$,而新生代新近纪盖层电阻率一般在几百 $\Omega \cdot \text{m}$,中生代和上古生代盖层电阻率一般 2 000 $\Omega \cdot \text{m}$ 左右,因此 3 种地层之间均有较大的电性差异。而直流电测深、CSAMT 法和 MT 法均是基于地质体的电性差异解决地质问题的物探方法,因此利用直流电测深、CSAMT 法和 MT 法了解奥陶系顶板的起伏并划分盖层是可行的。断裂构造由于本身破碎,具含水性,一般表现为低阻特征,也可通过电性层的追踪加以判识。

表 1 工作区地层电阻率统计
Table 1 Statistical of formation resistivity in working area

地质年代	岩性	电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)
新近纪	砂岩	几百
石炭纪、二叠纪	砂岩、泥岩、炭质页岩	2000 左右
奥陶纪	灰岩、泥质灰岩	3000~4000

2 技术方法

2.1 工作布设

在工作区内(图 3)自南向北依次布设 4 条物探

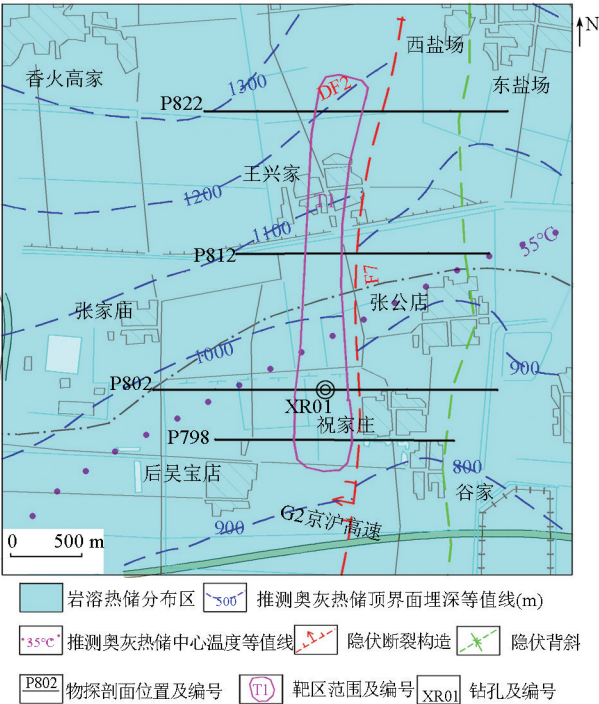


图 3 工作布设

Fig.3 Work layout plan

剖面 P798、P802、P812、P822, 其中, P802、P812、P822 为综合物探剖面,开展直流电测深、CSAMT、MT 这 3 种物探方法,P798 为 MT 剖面,主要目的是控制近 SN 向构造 F_7 。其中直流电测深及 CSAMT 点距均为 100 m,重点部位加密至 50 m;MT 点距 300 m,重点部位加密至 150 m,通过 3 种物探方法结合,期望获得 3 km 以浅的视电阻率分布特征。

2.2 工作参数

本次直流电测深工作采用重庆万马物探仪器有限公司生产的 WJD-3 多功能数字直流激电仪,采用对称四极不等比装置, $AB/2_{\min} = 3 \text{ m}$, $AB/2_{\max} = 2\,000 \text{ m}$ 。采用极距为: $AB/2 = 3、6、9、15、22、34、50、70、100、150、220、340、500、750、1000、1250、1500、1750、2000 \text{ m}$ 。 $MN/2 = 1、5、50、100 \text{ m}$ 。

本次 CSAMT 工作使用加拿大凤凰地球物理有限公司生产的 V8 电法工作站,包括 SGC-34 发电机、TXU-30 发射机、V8-6R 多功能接收机、RXU-3ER 辅助接收机、AMTC-30 高频磁棒。装置选择赤道偶极装置,测量方式为标量测量,测量模式选择 TM。标量 CSAMT 测量利用一个场源测量两个分量(E_x 和 H_y)。收发距 $R = 8 \sim 10 \text{ km}$,发射电源偶极距 $AB = 2.0 \text{ km}$,工作频率选择 $9\,600 \sim 0.125 \text{ Hz}$ 。

本次 MT 工作使用加拿大凤凰地球物理有限公司生产的 V8 多功能电法工作站,包括 V8-6R 多功能接收机、RXU-3ER 辅助接收机、MTC-50 低频磁棒。布极采用十字型(a)、L 型(b)或 T 型(c)装置,电极距 80 m。

2.3 单支曲线

图 4a 为 300/P802 点直流电测深单支曲线,总体来看符合 KH 型电测深曲线特征。图 4b 的 CSAMT 测深曲线过渡带低估出现在 2 Hz 左右,卡尼亚电阻率曲线总体反映了地下层状地层的分布特征。图 4c 的 MT 测深曲线特征与直流电测深曲线特征类似,两个主轴的卡尼亚视电阻率曲线符合 KH 曲线特征。

3 成果解释及钻探验证

3.1 断裂产状

根据各条剖面的推断地质断面(图 5~图 8), F_7 隐伏于新近系及第四系之下,埋深 500 m 左右。新近系及第四系厚度呈北厚南薄,西厚东薄的特征。根据推断成果, F_7 断裂倾向 W,倾角 $70^\circ \sim 80^\circ$ 。断

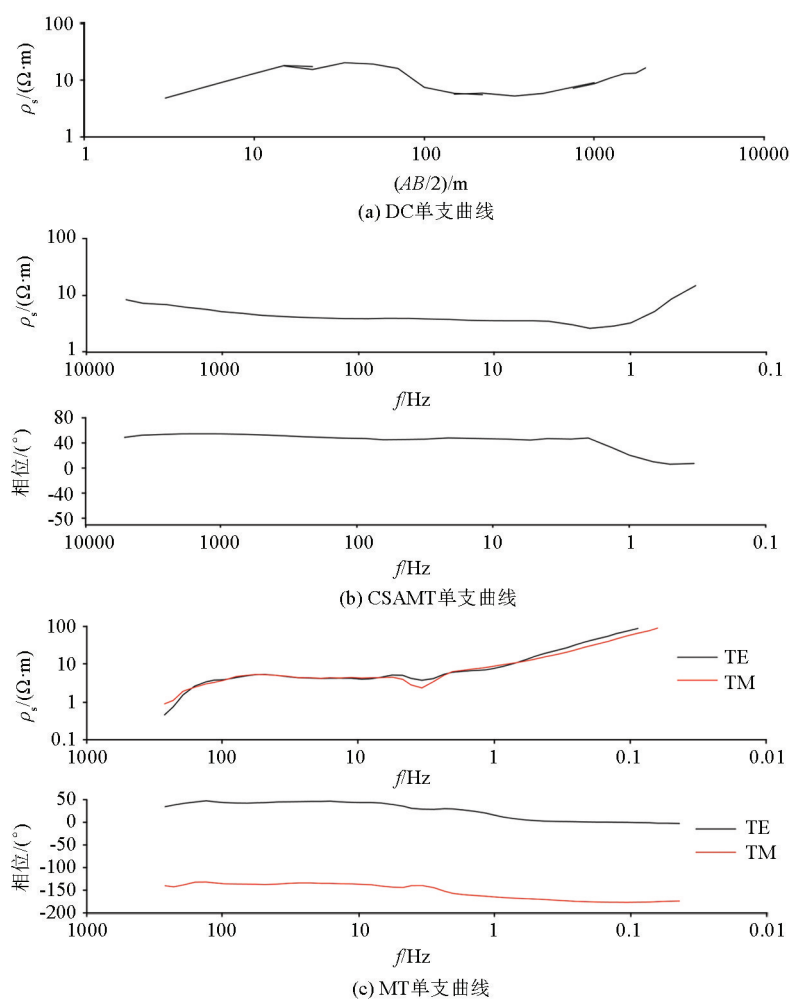


图4 300/P802点原始测量曲线

Fig. 4 The original measurement curve of 300/P802 point

裂在地表投影位置, P798 位于 3 150 m, P802 位于 3 100 m、P812 位于 3 200 m、P822 位于 3 150 m 附近, 推断该断裂在剖面控制部位, 南端部走向 NNE, 北端部走向 NNW, 总体近 NS 向。从断裂上下盘视电阻率等值线特征来看, 除 P812 剖面 CSAMT 及直流电测深一维反演断面图外, 其它断面图中断裂上盘电阻率明显要低于下盘, 推测断裂活动造成上下盘错动, 上盘灰岩埋深更大, 呈现相对低阻, 下盘灰岩埋深小, 因此呈现相对高阻, 断裂断距在 100~200 m 之间, 且呈现自南向北断距逐渐加大特征, 灰岩埋深自南向北也逐渐变深, F_7 断裂为一正断层。P812 剖面 CSAMT 及直流电测深一维反演断面图上断裂呈现上盘高阻, 下盘低阻的特征, 与 MT 断面图相反, 推测是 CSAMT 及直流电测深测量深度低于 MT, 而测点密度要高于 MT, 该剖面处灰岩埋深为 1 000 m 左右, 上盘相对高阻的形成可能是局部石灰岩溶洞引起。

3.2 断裂性质

F_7 断裂上盘在 MT 视电阻率等值线图上的相对

低值区, 自 P798 剖面向北, 由“V”字型低阻区, 过渡为“U”字型宽缓低阻区, 到 P822 剖面, F_7 断裂呈现密集梯级带特征, 断裂上下盘电阻率则呈现明显的台阶型差异。综合分析, 一方面自 P798 剖面向北, F_7 断距逐渐加大; 另一方面上覆低阻新近系、第四系地层变厚, 两种因素综合作用下自 P798 剖面向北 MT 视电阻率特征产生这一差异。此外, 在断裂下盘, 自 P802 剖面向北, MT 视电阻率数值自西向东均呈现先升高后降低的特征, 推测 F_7 断裂下盘灰岩顶板埋深自西向东埋深先增大后减小, 断裂位于隐伏背斜构造西翼位置, 整体受力为张性作用力, 另外, 相对于围岩的“U”字形、“V”字形低阻区初步推断是断裂含水的反映, 因此综合推断 F_7 断裂为一张性正断层。

3.3 地热靶区圈定

根据对断裂性质的分析, 将 F_7 断裂上盘沿断裂走向的条带状位置作为寻找深部地热资源的有利靶区, 靶区编号 T1(图3)。靶区内基岩埋深约为 500 m,

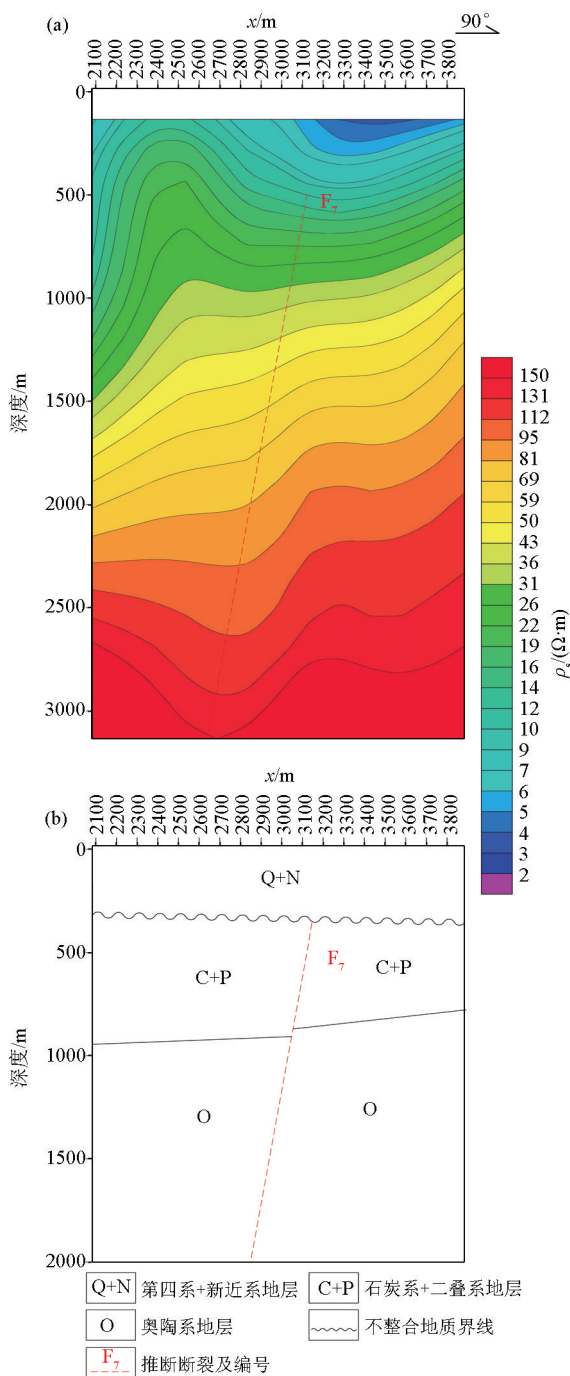


图5 P798剖面MT测量视电阻率断面(a)与地质推断断面(b)

Fig. 5 Apparent resistivity section (a) and geology section (b) of P798 MT measurement

奥陶系灰岩顶板埋深 800~1 000 m, F_7 断裂近 NS 走向, 推断为一张性正断裂, 断裂倾向西, 倾角 $70^\circ \sim 80^\circ$, 断距 100~200 m, 且自南向北断距逐渐加大。

3.4 含水性分析及钻探验证

MT 视电阻率断面上显示, 至 3 000 m 深度后, 梯级带或“U”字形、“V”字形特征仍较为明显, 推断断裂下延切割深度较大, 自南向北, “V”字形特征逐渐过渡到梯级带特征, MT 测深叠置立体图(图 9)显

示, P802 与 P812 剖面之间深度 1 980 m 及 1 480 m 处在断裂 F_7 西侧位置存在一局部高电阻率异常区, 导致沿 F_7 断裂上盘方向形成“哑铃”状特征, 两侧为“喇叭”开口状的低值异常区, 推测两侧岩石破碎程度更高, 富水性更好, “哑铃”细部高电阻率区岩石破碎程度要低一些。由于奥陶系灰岩整体为自南向北倾伏, 地下水也是自南向北流动, “哑铃”细部高值区起到了一定阻水作用, 因此推测 F_7 断裂在南端部靠近局部高电阻率异常区的 P802 剖面位置富水性要更好。在 P802 剖面上布设钻孔 XR01 进行验证(图 3), 设计孔深 1 500 m, 最终完井深度 1 532.06 m, 经试验测算, 静水位埋深 13.03 m, 孔口水温 $50.1^\circ C$, 涌水量 $132.998 m^3/h$, 降深 18.27 m, 为目前先行区岩溶热储第一井。

4 结论及讨论

1) 济北地热田大部分为第四系覆盖, 地表可见的地质线索较少, 在开展工作之前, 搜集工作区已有的地震、重力等资料, 对于目标勘探层—奥陶系灰岩岩溶热储地层的基本地质及热储情况有了初步认识, 在此基础上结合政府规划来划定工作区。

2) 工作区沉积层序由老及新相对完整, 横向变化不大, 地层电阻率由新到老逐渐增大, 断裂构造导致连续地层破碎, 富水后表现为低阻特征, 基于这一特点, 选定直流电测深、CSAMT 方法、MT 方法, 对断裂加以追踪判识, 划定地热靶区, 在此基础上对断裂含水特性进行分析研究, 开展钻探验证。

3) 直流电测深适合研究浅部电阻率分布特征, 弥补 CSAMT、MT 方法浅部探测分辨率不足及盲区问题; CSAMT 方法适合 1 000 m 左右埋深, 更深层则需要依靠 MT 方法。钻探验证结果证明, 3 种方法相互补充互相印证, 在济北第四系巨厚沉积地区, 查明深部隐伏断裂赋存位置、产状及含水特征是切实可行且经济有效的方法。

参考文献(References):

- [1] 史忠民, 李传磊, 程秀明, 等. 济北地热田地质特征[J]. 山东国土资源, 2005, 21(11): 39-42.
Shi Z M, Li C L, Cheng X M, et al. Geological characteristics of geothermal field in north of Jinan city[J]. Land and Resources in Shandong Province, 2005, 21(11): 39-42.
- [2] 曾昭发, 陈雄, 李静, 等. 地热地球物理勘探新进展[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(1): 168-178.
Zeng Z F, Chen X, Li J, et al. Advancement of geothermal geophysics exploration[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(1): 168-178.

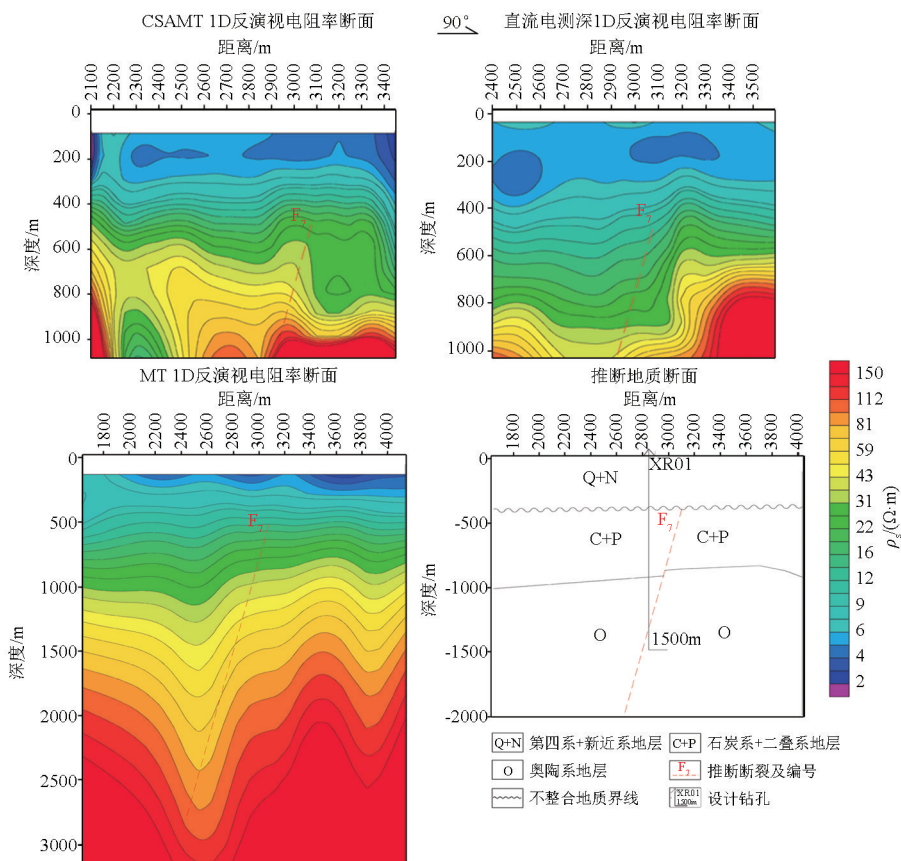


Fig. 6 P802 profile geophysical survey results

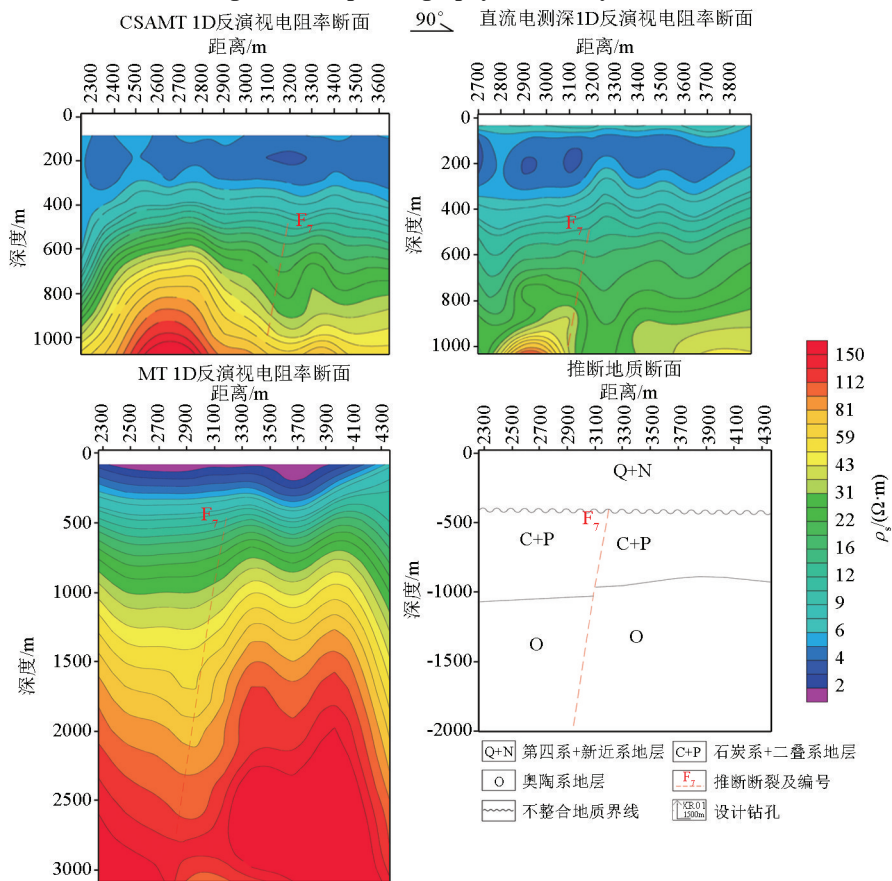


Fig. 7 P812 profile geophysical survey results

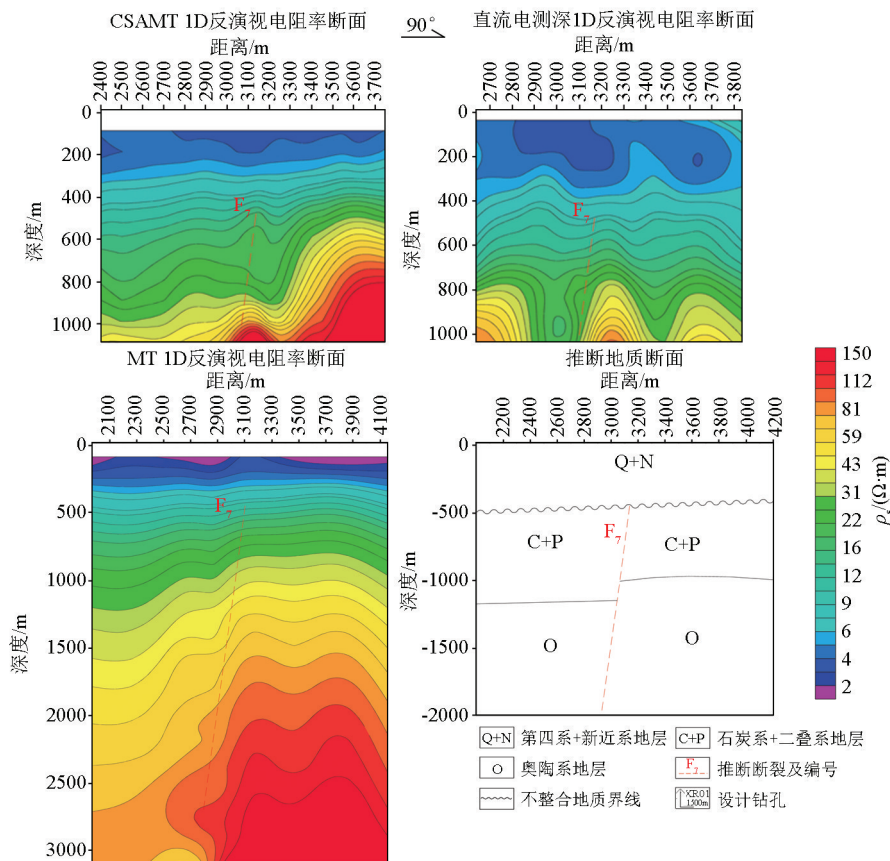


图 8 P822 剖面物探测量成果

Fig. 8 P822 profile geophysical survey results

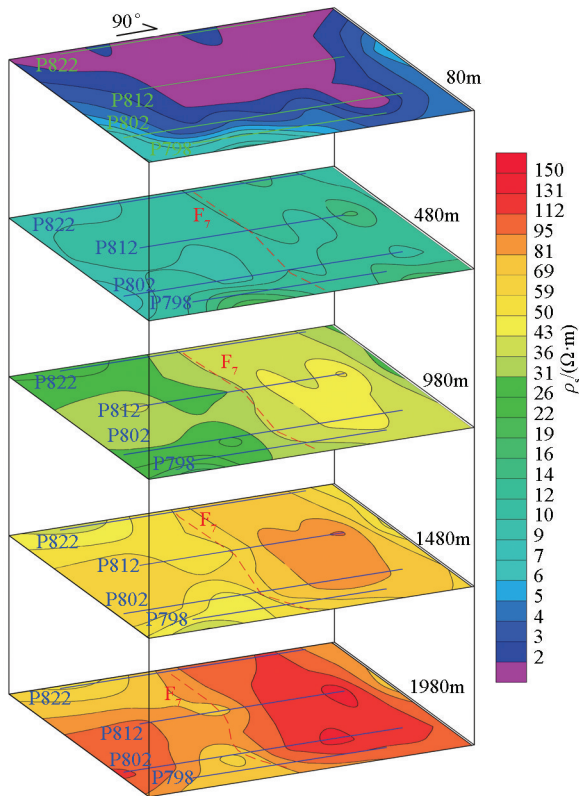


图 9 MT 测量叠置立体图

Fig. 9 MT measurement overlay stereogram

- [3] 刘瑞德. 地热田电磁法勘查与应用技术研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2008.
Liu R D. The study of electromagnetic prospecting and applied technology on geothermal field [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2008.
- [4] 李大心, 贾菱希. 应用物探方法研究地热区地温场分布[J]. 地质科技情报, 1989, 8(4): 121-126.
Li D X, Jia L X. Application of exploration geophysics for studying geothermal distribution in geo-thermal areas [J]. Geological Science and Technology Information, 1989, 8(4): 121-126.
- [5] 杨锋杰, 韩震, 江涛, 等. 地热资源的热红外遥感[J]. 矿山测量, 1999(3): 25-27, 59.
Yang F J, Han Z, Jiang T, et al. Thermal infrared remote sensing of geothermal resources [J]. Mine Surveying, 1999(3): 25-27, 59.
- [6] 金永念, 张登明, 刘志平. 综合地球物理勘查技术在地热勘查中的应用[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(1): 92-94, 106.
Jin Y N, Zhang D M, Liu Z P. The application of integral geophysical survey technology in geothermal exploration [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(1): 92-94, 106.
- [7] 阴曼宁, 安存杰, 金玉洁. 综合物化探方法在内蒙古某地区地热勘探中的应用[J]. 物探与化探, 2007, 31(4): 313-316.
Yin M N, An C J, Jin Y J. The application of the integrated geophysical and geochemical methods to the geothermal exploration in a certain area of inner Mongolia [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 31(4): 313-316.
- [8] 柳建新, 郭振威, 郭荣文, 等. CSAMT 和重力方法在狮子湖温泉

- 深部地球物理勘查中的应用[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(5): 1868-1873.
- Liu J X, Guo Z W, Guo R W, et al. Application of controlled source audiomagnetotelluric and gravity methods to survey the Lionlake hot spring geothermal area[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(5): 1868-1873.
- [9] 李百寿, 秦其明, 侯贵廷, 等. 被动式超低频电磁法在深部地热资源勘察中的应用——以 JR-119 井及 JR-168 井为例[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(2): 699-706.
- Li B S, Qin Q M, Hou G T, et al. Applications of the passive Super Low Frequency (SLF) electromagnetic technique to exploration of geothermal energy sources[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(2): 699-706.
- [10] 秦其明, 李百寿, 崔容波, 等. 地热井的天然源超低频电磁探测影响因素分析[J]. 地球物理学报, 2010, 53(3): 685-694.
- Qin Q M, Li B S, Cui R B, et al. Analysis of factors affecting natural source SLF electromagnetic exploration at geothermal wells[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(3): 685-694.
- [11] 孙知新, 李百祥, 王志林. 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, 2011, 38(2): 119-124, 129.
- Sun Z X, Li B X, Wang Z L. Exploration of the possibility of hot dry rock occurring in the Qinghai Gonghe Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2011, 38(2): 119-124, 129.
- [12] 薛建球, 甘斌, 李百祥, 等. 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, 2013, 37(1): 35-41.
- Xue J Q, Gan B, Li B X, et al. Geological-geophysical characteristics of enhanced geothermal systems (hot dry rocks) in gonghe-guide basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(1): 35-41.
- [13] 刘振华, 李世峰, 杨特波, 等. 综合物探技术在邯郸地热田勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2013, 10(1): 111-116.
- Liu Z H, Li S F, Yang T B, et al. The application of integral geophysical survey technology in geothermal exploration of Handan area[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(1): 111-116.
- [14] 马晓东, 刘洪波, 白锦林. 综合物探在莘县地区地热勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2014, 38(3): 461-464.
- Ma X D, Liu H B, Bai J L. The application of integrated geophysical methods to the geothermal exploration in Shengxian area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(3): 461-464.
- [15] 左丽琼, 王彩会, 荆慧, 等. 综合物探方法在南通小洋口地区地热勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(1): 122-129.
- Zuo L Q, Wang C H, Jing H, et al. The application of comprehensive geophysical prospecting method to geothermal prospecting in Xiaoyangkou of Nantong city in Jiangsu[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2016, 13(1): 122-129.
- [16] 刘会毅, 徐坤, 国吉安, 等. 综合物探方法在安徽沱湖地区地热勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2018, 15(5): 648-654.
- Liu H Y, Xu K, Guo J A, et al. Application of integrated geophysical method to geothermal exploration in tuohu area of Anhui Province[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2018, 15(5): 648-654.
- [17] 陈昌昕, 严加永, 周文月, 等. 地热地球物理勘探现状与展望[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(4): 1223-1231.
- Chen C X, Yan J Y, Zhou W Y, et al. Status and prospects of geophysical method used in geothermal exploration[J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(4): 1223-1231.

Application of integrated geophysical exploration technology in the geothermal exploration of northern Jinan

ZHANG Yi^{1,2}, LIU Peng-Lei³, WANG Yu-Min^{1,2}, ZHANG Peng-Peng^{1,2}, ZHANG Chao^{1,2}, ZHANG Ning^{1,2}

(1. Shandong Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Jinan 250013, China; 2. Shandong Geological Exploration Engineering Technology Research Center, Jinan 250013, China; 3. Shandong Geology and Mineral Engineering Group Co., Ltd., Jinan 250299, China)

Abstract: Ji'nan possesses highly abundant geothermal resources, which are hosted by Ordovician-Cambrian karst-fissured geothermal reservoirs and Neogene-Paleogene clastic pore-fissure geothermal reservoirs. The geothermal exploration in this study focuses on the Ordovician-Cambrian karst fissured geothermal reservoirs in Daqiao Town in northern Ji'nan. Through geophysical profile measurements, this study aims to identify the distributions of strata and fault structures and the burial depths of geothermal reservoirs, infer the attitudes and spatial morphologies of fault structures associated with heat control and conduction, delineate the target area for geothermal well construction, and conduct drilling verification in the favorable underground water-rich position. Building on the collected data, this study interpreted and inferred the fault structures in the study area and comparatively analyzed the water-bearing properties by employing direct-current sounding, controlled source audio magnetotellurics, and magnetotelluric survey. A geothermal exploration and production combined well was constructed in a favorable position of the geothermal target area, manifesting a completion depth of 1 532.06 m, a static-water burial depth of 13.03 m, a wellhead water temperature of 50.1 °C, a water yield of 132.998 m³/h, and a dropdown depth of 18.27 m.

Key words: northern Ji'nan; geothermal exploration; direct-current sounding; controlled source audio magnetotellurics; magnetotelluric survey