

doi: 10.11720/wtyht.2020.1413

章惠,隋少强,钱焰然,等.多种非震方法在山东齐河地热勘查中的应用[J].物探与化探,2020,44(4):727-733.http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1413

Zhang H, Sui S Q, Qian L R, et al. The application of multiple non-seismic methods to geothermal exploration in Qihe, Shandong Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(4): 727-733. http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1413

多种非震方法在山东齐河地热勘查中的应用

章惠^{1,2}, 隋少强¹, 钱焰然³, 汪新伟¹

(1. 中石化新星石油公司新能源研究院, 北京 100083; 2. 中石化石油物探技术研究院, 江苏 南京 211103; 3. 中石化石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘 要: 非震地球物理勘探方法是目前地热勘查的有效手段。本文以山东齐河荣盛温泉小镇为例, 针对该区断裂较为发育, 地层横向变化大, 地质条件复杂的难点问题, 综合考虑地层电性和地层速度差异特征, 采取“两步走”方式进行地热勘查。第一步利用电磁方法查明研究区断裂构造位置和热储埋深, 初步圈定有利的富水区域; 第二步通过地微动方法验证断裂和地层的展布特征, 缩小目标靶区, 为地热井布设提供充足的依据。经钻井表明, 多种非震方法相结合具有较好的应用效果, 为今后复杂地质条件的地热勘探提供了有利的参考价值和重要的借鉴意义。

关键词: 可控源大地电磁方法; 地微动探测方法; 地热勘查; 山东齐河

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2020)04-0727-07

0 引言

地热是一种可再生的清洁能源。近年来, 为积极响应“打赢蓝天保卫战”的号召, 治理京津冀及周边“2+26”城市^[1]大气污染, 地热资源以其绿色环保的特点, 被广泛应用于北方清洁供暖。齐河县属于“2+26”城市的山东德州市, 已有钻井表明该区地热资源丰富, 以奥陶系灰岩热储层为主, 具有埋藏深度适中、水量大、水温较高的特点, 揭示了良好的勘探开发前景^[2-5]。该区整体勘探程度较低, 断裂较为发育, 以 NE 和 NW 向断裂为主, 且地层横向展布变化大, 热储埋深差异明显; 奥陶系灰岩热储层受断裂裂缝控制作用, 非均质性较强^[2-8]。因此, 在复杂地质条件下如何提高勘探的精度, 降低勘探的风险, 是灰岩热储勘探面临的重点问题和难点问题。

本次以齐河荣盛温泉小镇地区为例, 在充分收集消化吸收前人资料的基础上, 坚持地质与物探相结合, 拟采取“两步走”的方式: 第一步利用电(磁)法勘探查明工作区内的断裂发育情况与分布特征、

热储埋藏深度及展布范围, 圈定岩溶热储富水区域; 第二步通过微动探测方法, 对岩溶热储富水区进一步验证, 缩小目标靶区, 以期地热钻井提供充分依据, 助力齐河地区地热供暖。

1 地质及地球物理特征

1.1 地质特征

1.1.1 构造特征

齐河地区位于鲁西隆起的西北部, 受多期构造运动影响, 呈现为 NW 倾斜的单斜构造。整体断裂裂缝发育, 隐伏断裂较多, 有 NNE—NE 向的庙廊—焦斌屯断裂、NW 向的桑梓店断裂和蛮子营断裂(图 1)。区域地质资料显示, 庙廊—焦斌屯断裂由多条次级正断层组成, 穿过研究区, 倾向 NW, 倾角 40°~70°, 切割深度大, 断层两侧奥陶系顶面垂直断距可达 1 000 m; 桑梓店断裂位于研究区北部, 倾向 SW, 断距约 100~200 m; 蛮子营断裂位于研究区南部, 倾向 NE, 倾角 75°~80°, 断距约 200 m^[2-4]。区内断裂构造对地下热水的运移和分布起着重要作用, 是主

收稿日期: 2019-09-02; 修回日期: 2020-05-20

基金项目: 中石化科技部项目“渤海湾盆地重点地区地热资源评价与开发技术政策”(JP19002-1)

作者简介: 章惠(1987-), 女, 工程师, 硕士, 主要从事地热地球物理勘探工作。Email: zhanghui714@126.com

通讯作者: 隋少强(1965-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事地热勘探开发工作。Email: 646101045@qq.com

要的控热控水断裂:一方面断裂有利于地球深部热源向上传导,另一方面断裂切割深部奥陶系灰岩,使灰岩地层破碎、岩溶发育,富水性好。

1.1.2 地层特征

结合已知钻井和区域地质研究,齐河地区地层由新到老有第四系、新近系、侏罗系、二叠系、石炭

系、奥陶系、寒武系和新太古代泰山岩群^[2-4]。从基岩地质图可以看出,地层整体由 SE 往 NW 方向埋深逐渐增加,其中侏罗系地层受庙廊—焦斌屯断裂控制,主要分布在断裂下降盘(图 1)。奥陶系灰岩为研究区热储层,埋藏深度在庙廊—焦斌屯断裂下降盘达 2 000 m 以深。

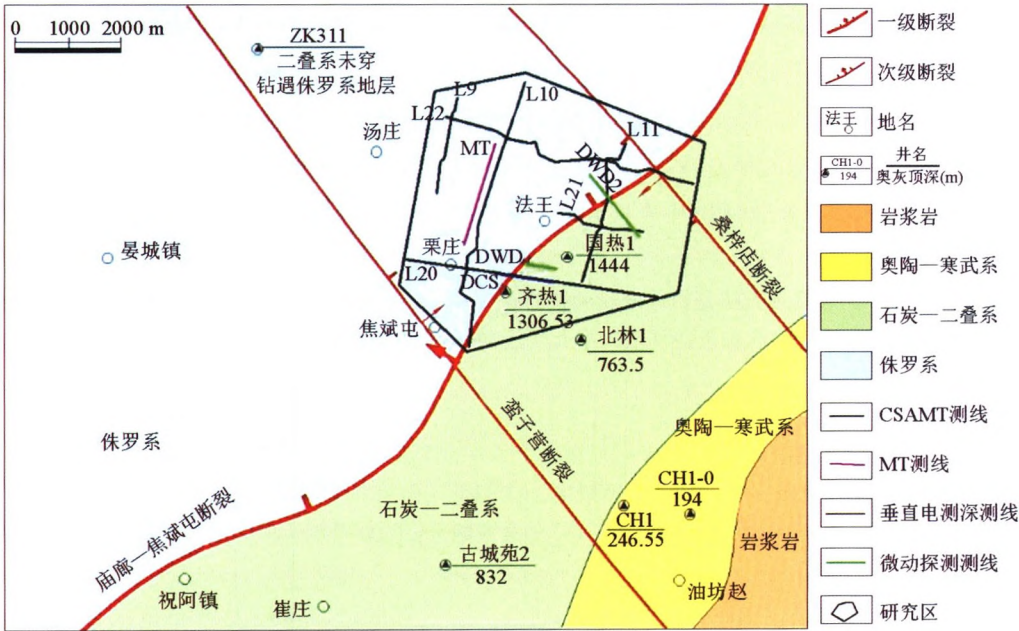


图 1 齐河地区构造地质简图
Fig.1 A brief map of tectonic geology in Qihe area

1.2 地球物理特征

通过收集本区及周边地区的岩矿石标本物性参数,了解了地层的电性特征和波速特征。从表 1 可以看出,工作区内地层大致可划分为 3 个电性层和 3 个波速层,第 1 层为第四系—新近系的低阻层和低速层;第 2 层为侏罗系—二叠系—石炭系的中阻

地层和中速层;第 3 层为奥陶系—寒武系的高阻层和高速层。但当有断裂存在时,地层较为破碎且充水,使得电阻率值降低,相对围岩而言,具有明显的低阻异常和低速异常,且等值线表现为梯级变化特征。不同的岩性地层具有明显的电性和速度差异,为地球物理勘探奠定了良好基础。

表 1 研究区地层物性参数
Table 1 The statistical table of stratigraphic physical properties in the study area

地层	主要岩性	电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)	横波速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
第四系—新近系	黏土、泥岩、粉砂岩、中细砂岩	0~60(低阻)	0~1600(低速)
侏罗系—二叠系—石炭系	砂泥岩、页岩夹煤层、薄层灰岩	60~200(中阻)	1600~2000(中速)
奥陶系—寒武系	灰岩	200 以上(高阻)	2000 以上(高速)

2 工作方法及测线布置

为避免单一的地球物理方法在复杂地质条件下应用的局限性,拟采用“两步走”的方式开展地热勘探工作。第一步以可控源音频大地电磁测深方法为主,配合少量的大地电磁测深和视电阻率垂向电测深法查明区内地质构造特征,明确热储分布范围。第二步利用微动探测方法进一步落实富水区域,为

井位布设提供充足依据。

2.1 电(磁)法勘探方法

可控源大地电磁测深方法(CSAMT)是利用人工发射的电磁场作为场源,探测地下不同深度的电性特征,具有抗干扰能力强、工作效率高的优势^[9-11]。研究区奥陶系灰岩埋藏深度达 2 000 m 以深,拟设定频点 9 600~0.125 Hz,收发距 10 km 左右,采用标量 CSAMT 方式进行观测。该方法测线布置如图 1 所示,布设两条 EW 向(L20、L22)、两条 SN

向(L10、L11)井字型剖面,目的为大致控制勘查区内断裂带发育情况,圈定异常靶区。在剖面 L10 北段西部布设平行剖面 L9;在剖面 L20、L22 中部布设平行剖面 L21,控制推断断裂延伸及发育情况。

大地电磁测深方法(MT)是以天然电磁场为场源的频率域电磁勘探方法,探测深度几公里至数百公里,但在城区内信号易受干扰,难以取得好资料^[12-13]。故本次以 MT 方法为辅对 CSAMT 探测深度有限的问题进行弥补,以期达到了解勘查区深部地层变化情况的目标。测线布置如图 1,在 SN 向剖面 L10 西侧布设 1 条 MT 剖面,点距 100 m,长度约 2 km。

视电阻率垂向电测深法基于人工电流场,通过改变供电电极 AB 的距离来观测同一测点在地下不同深度的电性特征。该方法对曲线类型识别准确,可较好的用于地层划分,但对于埋深大的地区,野外施工相对不灵活^[14]。因此仅利用该方法对可控源音频大地电磁测深方法探测结果进行验证。测线布置如图 1,在 L20 线中部布设视电阻率垂向测深剖面 1 条,长度约 1.5 km,最大 $AB/2=3\text{ m}$, $AB/MN=5$ 。

2.2 微动探测方法

微动探测是以大自然微弱的振动为场源,从微弱的信号中提取面波的频散曲线,通过对频散曲线反演获取地下速度结构信息的地球物理探测方法^[15]。该方法利用地层波速差异实现对地层结构的了解、具有相对较高的精度。根据地质目标,野外施工测量采用等间距台阵布设方式,每个台阵由 4 重圆、13 个数据采集点组成,其中 4 重圆半径分别为 $r=200\text{ m}$, $2r=400\text{ m}$, $3r=600\text{ m}$, $4r=800\text{ m}$,满足探测深度 3 000 m 的要求。为进一步了解研究区热储

埋深和断裂构造分布情况,为地热勘探钻孔定位提供详实的依据,对重点区域布设 2 条 NW 向线 DWD1、DWD2(图 1)。

3 物探成果综合解释

3.1 电(磁)法勘探成果解释

对采集的现场数据进行预处理和反演并绘制成图,其中 MT 数据主要用于对 CSAMT 深部信息进行校正,视电阻率垂直电测深用于验证 CSAMT 剖面解释的合理性^[16-17]。基于 CSAMT 剖面 and 平面图开展地层、断裂解释,并结合地质认识推断隐伏断裂展布规律和奥陶系顶面埋深及地热异常特征。

以 L11 和 L20 两条剖面为例(图 2),本区电阻率剖面纵向上具有低—中—高三分电性特征,横向上近水平展布略有起伏变化。第一层是低阻层,厚度较稳定,约 800~1 000 m,推断为第四系—新近系的黏土、砂岩反应,其中浅地表相对高阻为地表建筑物堆积引起的。第二层为中阻层,横向厚度变化较大,L11 剖面以点号 1 800 为界、L20 剖面以点号 2 300 为界—中阻层北深南浅、西深东浅,反应北部、西部地层埋藏深,厚度较大,结合地质资料和已知钻孔信息推断为侏罗系—二叠系—石炭系地层,奥陶系顶埋深 2 000 m 以深;南部、东部地层埋藏浅,厚度相对薄,推断为二叠系—石炭系地层,奥陶系顶埋深 1 800 m 以浅。第三层为高阻层,电阻率基本在 $200\text{ }\Omega\cdot\text{m}$ 以上,结合已知地质资料分析认为是奥陶系—寒武系灰岩的反应。根据断裂发育处会引起电阻率等值线波动或梯级变化的原则,认为 L11 剖面由南往北发育 F22、F11、F12 三条断裂,L20 剖面由西往东发育 F13、F21、F12、F11、F22 五条断裂。图 3

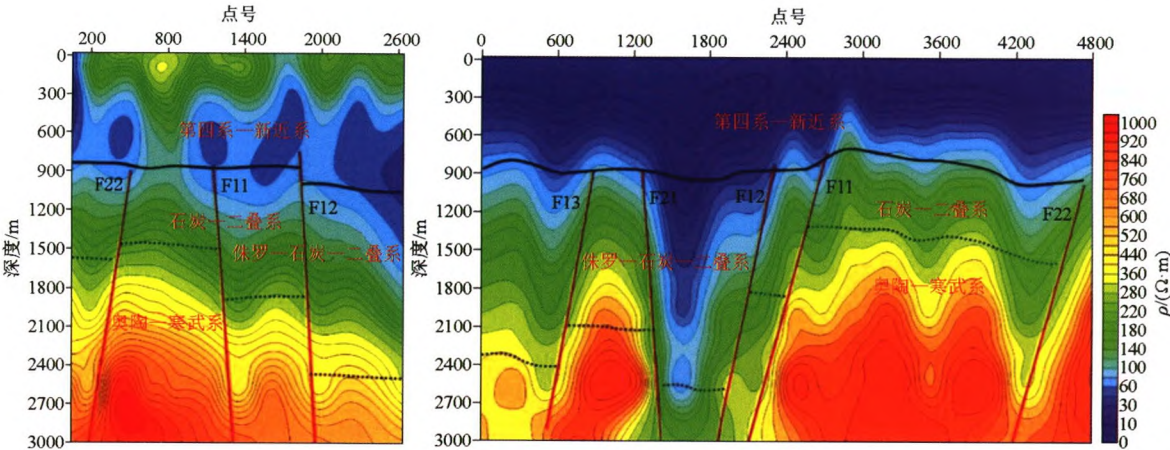


图 2 CSAMT 方法 L11 线(左)、L20 线(右)反演电阻率剖面及解释图

Fig.2 Inversion of resistivity profile and interpretation of CSAMT data for L11(left) , L20(right)

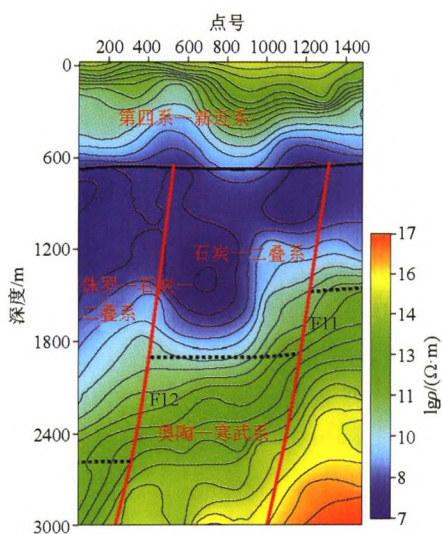


图 3 垂直电测深电阻率等值线断面图及解释图
Fig.3 Apparent resistivity section diagram and interpretation of vertical eectrical sounding data

为视电阻率垂直电测深剖面,该剖面布设于 L20 线 1 600~3 100 点附近。通过分析视电阻等值线在不同极距下的电性变化,结合地球物理特征,对剖面进行了地层和断裂解释。综合图 2 和图 3 可以看出,两种方法在识别断裂带发育位置、地层变化情况时具有较好的一致性,表明CSAMT剖面解释的准确

性和可靠性,起到了良好的对比验证效果。

基于对反演电阻率剖面地层和断裂的解释,结合不同深度的视电阻率值水平切片综合判断断裂分布规律、奥陶系顶面埋深及地热异常特征(图 4)。研究区主要发育 NE 向 F11、F12、F13、F14 断裂和 NW 向 F21、F22 断裂。各平面图由浅及深电阻率值呈现由低到高的变化趋势,平面上以 F12 断裂为界线,电阻率整体表现为西低东高,F12 西部热储盖层为第四系—新近系、石炭—二叠—侏罗系沉积地层,F12 东部热储盖层为第四系—新近系、石炭—二叠系沉积地层,与已知井 ZK311、齐热 1、国科 1 资料对应较好。平面图显示在 F12 附近及其东部区域,电阻率值相对较高,存在局部的低阻异常,认为该区域地层岩性破碎,裂隙发育,易形成富水区,是地热勘探重点区域;西部地层中存在明显的近 SN 向低阻异常带,该异常带南窄北宽,是 F13、F14、F21、F22 断裂的综合作用,为典型的断裂破碎带及影响带特征,推断该异常区域内,基岩破碎,断裂构造发育,奥陶系顶埋深局部大于 2 600 m。利用电磁方法对剖面上和平面上的电阻异常特征进行描述,圈定了高层中相对低阻异常带,实现了富水区域初步预测。

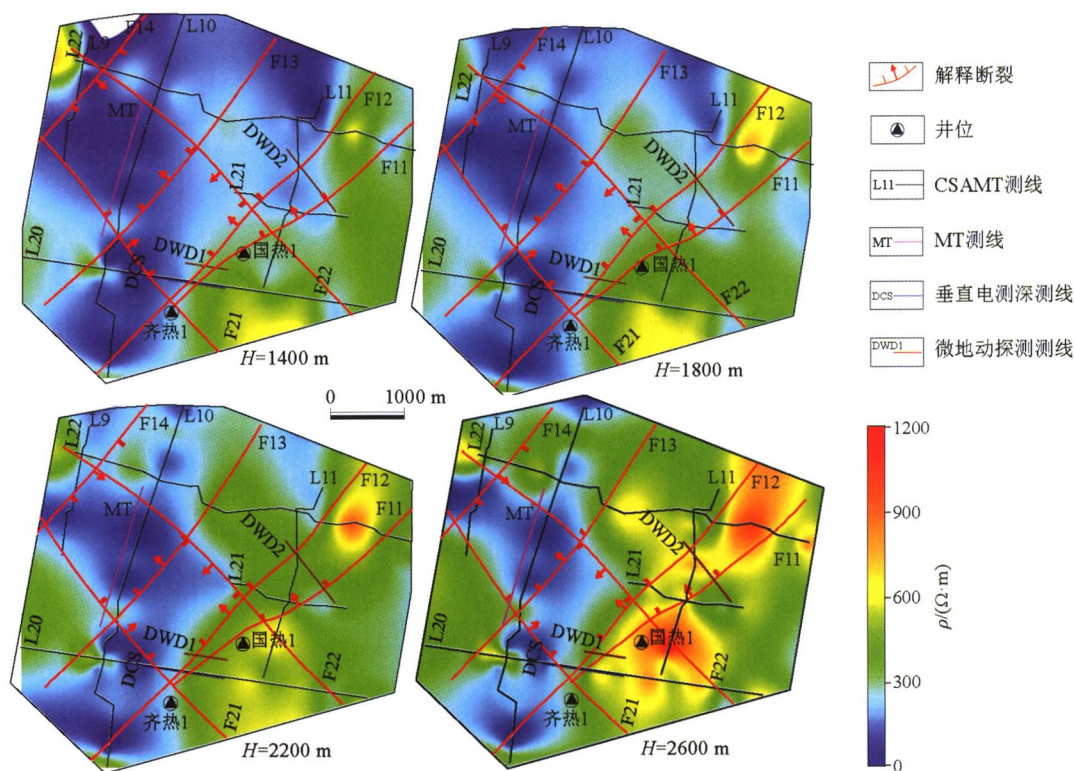


图 4 CSAMT 方法反演电阻率切片图及解释图
Fig.4 Inversion of resistivity slice diagram and interpretation of CSAMT data

3.2 微动探测成果解释

地微动剖面为进一步落实奥陶系灰岩地层内断裂发育特征,确定 F11、F12 断裂的产状和空间展布、研究区热储分布范围奠定了良好的基础。DWD1 剖面显示(图 5),本区横波速度剖面具有低—中—高三分的特征,其中第四系与新近系地层

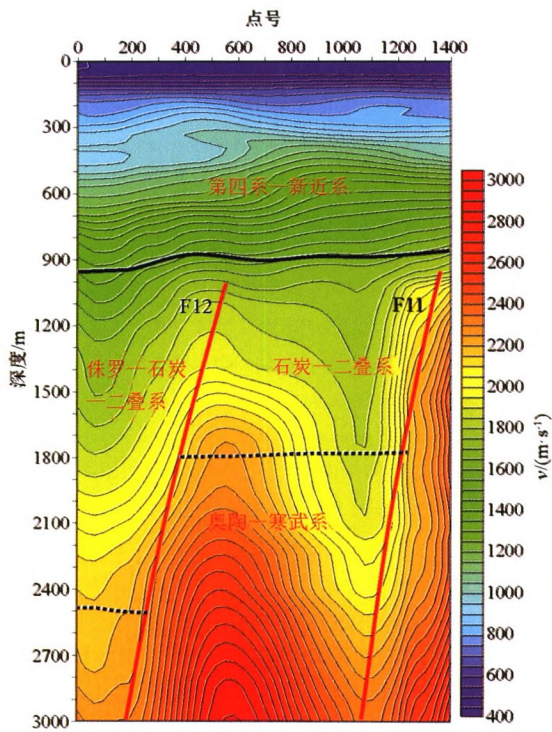


图 5 微动探测 DWD1 线反演横波速度剖面及解释图
Fig.5 Inversion of cross-wave velocity profile and interpretation of microtremor detection data

变化较平缓,为低速层;中部的侏罗系—石炭系—二叠系地层受断裂 F11 和 F12 控制厚度变化大,主要为砂泥岩夹煤层和薄层灰岩沉积,表现为中速层。下部速度达到 2 000 m·s⁻¹ 以上,地球物理特征显示为奥陶系灰岩沉积,顶面埋深约 1 800~2 500 m 之间。依据速度等值线推断 F11、F12 两条断裂,该断裂带相对位置及产状与 CSAMT 剖面中 F11、F12 断裂对应良好。

3.3 综合成果解释分析

研究区热储为奥陶系灰岩,通过多种非震方法剖面 and 平面相结合,相互佐证,对奥陶系顶埋深进行了绘制(图 6)。奥陶系顶埋深以 F12 断裂为界,在断裂西边奥陶系顶面 2 000 m 以深为主,东边整体埋藏约 2 000 m 以浅。结合地质资料,推断 F11、F12 断裂属于庙廊—焦斌屯断裂影响带内,其中 F12 断裂断距大,为主断裂,F11 为次级断裂构造;F21 为蛮子营断裂的次级构造,F22 为桑梓店断裂的次级构造。

热储灰岩发育区域受断裂构造控制明显,在断裂附近或多组断裂交汇的部位,地层较为破碎,岩溶作用发育,热储含水性好^[6]。依据综合物探勘查的结果,将研究区地热资源进行了分类:奥陶系热储顶埋藏约 1 500 m 以浅,岩溶作用发育,富水性较好,是 I 类地热勘探有利区;奥陶系热储顶埋深 1 500~2 000 m 之间,断裂较为发育,地层破碎,富水性好,是 II 类地热勘探有利区;奥陶系顶热储埋深 2 000 m 以深,岩溶作用较弱,富水性一般,是 III 类地热勘探

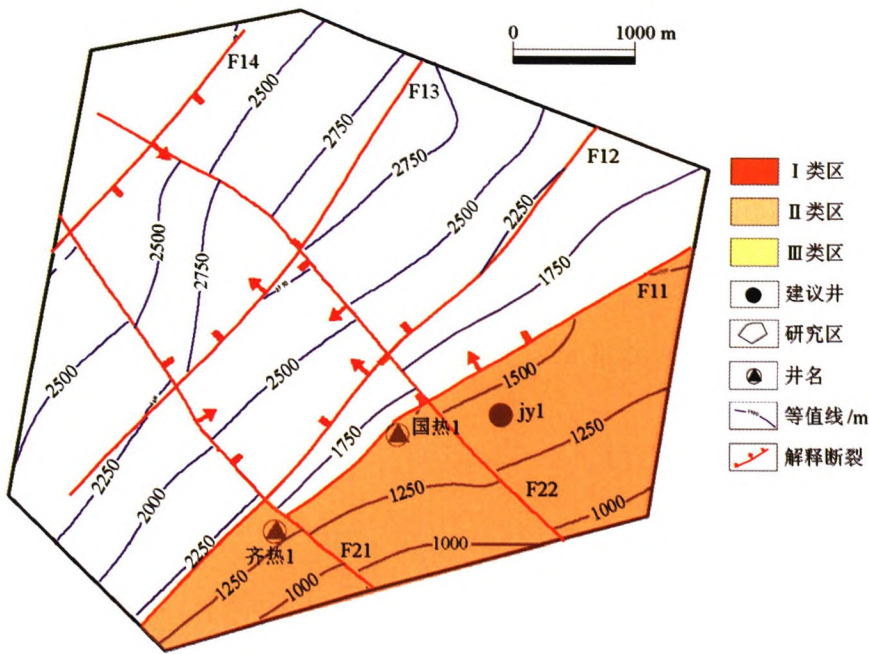


图 6 研究区综合物探解释成果平面图
Fig.6 Comprehensive geophysical interpretation results in the study area

有利区(图6)。建议在I类有利区内布设井位jy1。经实际钻探验证,该井为奥陶系灰岩热储,井口水温50℃,水量 $230\text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,与物探推断结果基本吻合,表明所选用的非震方法具有较好的应用效果。

4 结论

基于研究区地质特征,采取“两步走”的方式,电磁方法与地微动方法相结合,查明了研究区断裂发育情况与分布特征、热储埋藏深度及展布范围、有利地热勘探区域,取得了以下几点认识:

1)物探先行,地质指路,物探工作须建立在区域地质认识的基础之上。根据工区地质特征,选择高效经济的地球物理组合方法开展地热勘探相关工作,可以达到事半功倍的效果。

2)以可控源大地电磁方法为主,辅以大地电磁方法和垂直电测深方法可以较好的应用于城区地下地质研究,多种方法相互佐证,避免了单一方法的局限性和片面性。

3)在地热勘查中配合使用地微动探测方法,有效地验证了电磁勘探方法的合理性,提高了解释的精度。为今后复杂地质区的地热勘探工作提供了有价值的参考。

参考文献(References):

- [1] 胥彦玲,闫润生,邓明荣.“2+26”城市大气污染治理产业布局研究[J].中国环保产业,2019(8):15-20.
Xu Y L, Yan R S, Den M R. Study on the layout of air pollution control industry in the “2+26” urban area [J]. China Environmental Protection Industry, 2019(8): 15-20.
- [2] 任正和,尹训志,田庆安,等.大地电磁测深在齐河法王南部地区地热普查中的应用[J].山东国土资源,2012,28(12):44-48.
Ren Z H, Yin X Z, Tian Q A, et al. Application of magnetotelluric sounding (MT) method in geothermal exploration in southern Fawang village of Qihe county [J]. Land and Resources in Shandong Province, 2012, 28(12): 44-48.
- [3] 李常锁,杨磊,高卫新,等.济南北部地热田地地质特征浅析[J].山东国土资源,2008,24(4):35-39.
Li C S, Yang L, Gao W X, et al. Analysis on geological characteristics of geothermal field in North Part of Jinan city [J]. Land and Resources in Shandong Province, 2008, 24(4): 35-39.
- [4] 尚敏,易武,张兰新.济南北部地区地热资源形成条件研究[J].三峡大学学报:自然科学版,2008,30(4):22-25.
Shang M, Yi W, Zhang L X. Research on forming condition of geothermal resources in north region of Jinan [J]. Journal of China Three Gorges University: Natural Sciences, 2008, 30(4): 22-25.
- [5] 尚宇宁,高明志,吴立进,等.济南北部地热资源区划研究[J].中国地质,2012,39(3):778-783.
Shang Y N, Gao M Z, Wu L J, et al. Division of geothermal resources in northern Jinan [J]. Geology in China, 2012, 39(3): 778-783.
- [6] 李常锁,赵玉祥,王少娟,等.山东济南北部地热田富水规律分析[J].地球与环境,2008,36(2):155-160.
Li C S, Zhao Y X, Wang S J, et al. Analysis of the rules of water enrichment in the geothermal field, Northern Jinan, Shandong Province [J]. Earth and Environment, 2008, 36(2): 155-160.
- [7] 赵宝峰,汪启年,官大维.带状热储地热田的地球物理场特征——以湖南省热水圩地热田为例[J].物探与化探,2019,43(4):734-740.
Zhao B F, Wang Q N, Guan D W. The geophysical field characteristics of geothermal field with banded reservoir-Taking an example of Reshui-Town geothermal field [J]. Hunan Province, 2019, 43(4): 734-740.
- [8] 王文昌,李建新.可控源音频大地电磁测深在新疆温泉县地热勘查中的应用[J].工程地球物理学报,2014,11(3):338-341.
Wang W C, Li J X. The application of CSAMT technique to geothermal prospecting in Wenquan county in Xinjiang [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2014, 11(3): 338-341.
- [9] 黄力军,孟银生,陆桂福.可控源音频大地电磁测深在深部地热资源勘查中的应用[J].物探与化探计算技术,2007,29(s1):60-64.
Huang L J, Meng Y S, Lu G F. An application of CSAMT sounding to exploration of deep geothermal resources [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2007, 29(s1): 60-64.
- [10] 郭守望,李百祥,周小波,等.电法在甘子河断裂对流型地热资源勘查中的应用[J].物探与化探,2013,37(2):229-232.
Guo S Y, Li B X, Zhou X B, et al. The application of the remote sensing and electric methods to geothermal water exploration [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(2): 229-232.
- [11] 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 integrated geophysical survey technology in geothermal exploration of Handan area [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2013, 10(1): 111-116.
- [12] 黄力军,陆桂福,刘瑞德,等.电磁测深方法在深部地热资源调查中的应用[J].物探与化探,2004,28(6):493-495.
Huang L J, Lu G F, Liu R D, et al. The application of electromagnetic sounding method in deep geothermal investigation [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2004, 28(6): 493-495.
- [13] 朱怀亮,胥博文,刘志龙,等.大地电磁测深法在银川盆地地热资源调查评价中的应用[J].物探与化探,2019,43(4):718-725.
Zhu H L, Xu B W, Liu Z L, et al. The application of magnetotelluric sounding to geothermal resources assessment in Yinchuan Basin [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(4): 718-725.
- [14] 刘国兴.电法勘探原理与方法[M].北京:地质出版社,2005.
Liu G X. The principle and method of electrical prospecting [M].

Beijing; Geological Publishing House, 2005.

[15] 刘远.地微动探测与大地电磁测深联合使用的研究[D].北京:中国地质大学(北京), 2008.

Liu Y. Study of microtremor and megnetotelluric associated survey [D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2008.

[16] 孙海川,刘永亮,邵程龙.综合物探在海石湾地区地热勘查中的应用[J].物探与化探, 2019, 43(2): 290 - 297.

Sun H C, Liu Y L, Shao C L. The application of integrated geophys- ical exploration to geothermal exploration in Haishiwan area [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43 (2): 290 - 297.

[17] 张德权,石生明,程建祥,等.物探方法在汤池河地热勘查中的应用效果[J].水文地质工程地质, 2005, 32(1): 102 - 104.

Zhang D Q, Shi S M, Cheng J X, et al. The application of geophysical method at Tangchi river geothermal exploration [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, 32(1): 102 - 104.

The application of multiple non-seismic methods to geothermal exploration in Qihe, Shandong Province

ZHANG Hui^{1,2}, SUI Shao-Qiang¹, QIAN Luo-Ran³, WANG Xin-Wei¹

(1. New Energy Research Institute, Sinopec Star Petroleum Co. Ltd., Beijing 100083, China; 2. Sinopec Geophysical Research Institute, Nanjing 211103, China; 3. Sinopec Petroleum Exploration and Development Research Institute, Beijing 100083, China)

Abstract: Non-seismic methods have been proved to be effective in geothermal exploration. This paper describes a two-step method for investigating the geothermal potential in Fountain Village, Rongsheng, Qihe, Shandong Province. The geological background of the target area is very complicated; for instance, many complex faults are developed and the formations usually have strong horizontal anisotropic property, which enhances the difficulty of exploration. The two-step method put forward by the authors utilizes the electrical and elastic features in different formations to solve these difficulties. The first step is to investigate the location of huge fault structure and the depth of resources by using electromagnetic method, which can locate the water-rich regions. The second step focuses on the more precise features of faults based on microtremors method. This method can help locate the sweet spot area more accurately and bring constructive suggestions to well location determination. Drilling results have testified the feasibility and applicability of this two-step method, which opens up a new path in complex geothermal exploration.

Key words: CSAMT; microtremors survey; geothermal exploration; Qihe in Shandong Province

(本文编辑:叶佩)