

The Application of the Integrated Geophysical Exploration to Geothermal Resource Survey in Sihe Area of Fuxin City

Xiaodong Lei^{1,2}, Yi He^{1,2}, Juan Li¹

¹Beijing Institute of Geo-Exploration and Technology, Beijing

²Beijing Huaqing Geothermal Exploitation Company Ltd., Beijing

Email: lei-xiaodong@139.com

Received: Jun. 19th, 2013; revised: Oct. 22nd, 2013; accepted: Oct. 28th, 2013

Abstract: The Sihe area of Fuxin city is a blank area of exploration and development of geothermal resources. In order to investigate the occurrence and formation of geothermal resources, several methods, such as gravity exploration, magnetic exploration, CSAMT and the land electrotelluric lithological detection technique are applied in the exploration area. The comprehensive analysis results show that there are two faults with NE direction (named F1, F2) and one fault with NW direction (named F3) which together control the geological conditions of geothermal resources, and the geothermal reservoirs are divided into two main layer groups: the upper one is basalt and esite reservoir of Yixian formation of Jurassic-Cretaceous, and the lower one is dolomite reservoir of Mesoproterozoic Wumishan formation of Jixian. Geothermal exploration target is located in the south of the project site with the area 12.05 km²; and the depth of the upper heat stratum layer roof is 700 - 1400 m with the temperature of 25°C - 44°C, while the depth of the lower heat stratum layer roof is 1100 - 1800 m with the temperature of 36°C - 56°C. Based on the above results, two investigation wells have been designed at the location of favorable geological conditions in the exploration area. It shows that the multiple solutions by the single method can be effectively avoided through the results of integral geophysical survey which could provide an important scientific basis for further drilling work.

Keywords: Geothermal Resources; Integral Geophysical Survey; CSAMT; Fuxin

综合地球物理方法在阜新市四合地区 地热资源普查中的应用

雷晓东^{1,2}, 何 祎^{1,2}, 李 娟¹

¹北京市地质勘察技术院, 北京

²北京市华清地热开发有限责任公司, 北京

Email: lei-xiaodong@139.com

收稿日期: 2013年6月19日; 修回日期: 2013年10月22日; 录用日期: 2013年10月28日

摘 要: 阜新市四合地区是地热资源勘查开发的空白区。为查明地热资源赋存状况, 本次工作采用重力勘探、磁力勘探、可控源音频大地电磁测深、大地电场岩性探测等多种方法进行了综合地球物理推断解释。结果表明: 项目区存在2条北东向断裂F1、F2和1条北西向断裂F3, 这些断裂共同控制了区内地热地质条件; 项目区发育两套热储层, 上部为侏罗-白垩系义县组玄武岩、安山岩, 下部为中元古界蓟县系雾迷山组白云岩。项目区南部为地热勘探靶区, 面积12.05 km²; 其上部热储层顶板埋深700~1400 m, 顶板温度25°C~44°C, 下部热储层顶板埋深1100~1800 m, 顶板温度36°C~56°C。最终在

作者简介: 雷晓东(1983-), 男, 工程师, 水文学硕士, 主要从事水文地质及综合勘查工作。

勘探靶区内地热地质条件有利的部位设计了2眼勘探井。综合地球物理勘探成果有效地避免了单一方法的多解性, 为下一步钻探工作的开展提供了重要的科学依据。

关键词: 地热资源; 综合地球物理方法; 可控源音频大地电磁测深; 阜新

1. 引言

地热资源是清洁环保的新兴可再生能源, 开发利用地热资源已成为当前全球应对气候变化、发展低碳经济的重要方向。2011年, 国际能源署(IEA)正式发布了世界地热能技术路线图^[1], 为地热资源的开发利用指明了方向。近年来, 中国科学院组织编制了包括地热能在内的中国能源技术路线图, 指明了产业发展的路线首先是摸清资源家底, 启动调查项目, 确定国内具有经济开发价值的重点地域^[2]。处于中国东北地区的辽宁省地热资源丰富, 开发形势喜人。为落实辽宁省政府提出打造温泉旅游大省的战略决策和关于加强地热资源勘查开发的要求, 近年来在阜新市四合地区开展了地热资源普查工作, 目的是进一步了解和评价该区地热资源赋存状况, 为未来开发利用提供依据。

2. 项目区概况

项目区范围包括阜新市细河区、经济开发区、阜新玉龙新城部分地区及其邻近村镇, 面积41.83 km²。大地构造位置处于中朝准地台辽西台陷中, 阜新-义县盆地的北东端。地层从老到新有: 中元古界蓟县系雾迷山组(Jxw)含砂屑白云岩及厚层燧石条带白云岩夹硅质层; 中生界孙家湾组(K_{2s})砂砾岩、砂岩及泥岩, 侏罗-白垩系义县组(JKy)玄武岩、安山岩以及新生界(Kz)冲积、坡积的白色砂砾石层, 黄色砂粘土等。新生界厚度在50 m左右。

3. 综合地球物理勘查方法

中国北方地热资源一般以中低温沉积盆地型为主, 地热田常沿大型导热构造呈带状分布^[3]。这些构造及其所控制的地层结构在深部区域往往比较复杂。单一的地球物理勘查方法存在局限性, 很可能导致地质推断上的多解性^[4]。因此, 综合利用多种方法从不同角度来研究同一对象能更好地接近实际, 获得对地下构造更全面的认识。

3.1. 地球物理勘查前提

刘光鼎院士曾总结出“一、二、三、多”的综合地球物理解释原则^[5], 即: 一种指导、二个环节、三项结合、多次反馈。其中二个环节之一是岩石的物性。岩石物性是联系地质与地球物理之间的纽带。开展地球物理勘查工作的前提是项目区各时代地层之间有一定的物性差异, 利用这种差异方可确定地层界线及断裂构造位置。项目区地层主要有: 第四系、侏罗-白垩系及蓟县系等。前人对上述各时代地层的物性特征进行了统计, 结果显示各时代地层之间均存在一定的物性差异(见表1), 这是在项目区及周边地区采用重力勘探、磁力勘探等地球物理方法进行勘查的前提条件。

3.2. 地球物理勘查方法及工作布置

项目区地热资源类型上属于中低温沉积盆地型。沉积盆地型地热资源一般需要具备三个基本条件: 导热水断裂、热储盖层及热储层。综合物探勘查的主要任务是在前人地质、水文等资料的基础上查明项目区热储层埋深及有地热地质意义的断裂构造特征。

针对项目区特点, 本次勘查采用的物探方法有重力勘探、磁力勘探、可控源音频大地电磁测深(简称“CSAMT”)及大地电场岩性探测。首先投入了比例尺为1:25,000的面积性勘查, 包括重力勘探和磁力勘探, 初步确定了断裂构造位置, 在此基础上布置了可

Table 1. Statistical tables of physical parameters of strata
表 1. 各时代地层物性参数统计表

地层	磁性	电阻率($\Omega \cdot m$)	密度特征(g/cm^3)
第四系	弱	20~60	2.15
白垩系	弱	12~22	2.50
侏罗-白垩系	弱	12~174	2.50
蓟县系	弱	540~1000	2.80
岩浆岩	中-强	大于500	2.60

控源音频大地电磁测深剖面 5 条(测点点距 50 m, 频率范围为 1~8192 Hz), 查明了地层产状及断裂构造特征, 最后在断裂附近布置了 20 个大地电场岩性探测点, 查明了含水层分布位置及厚度、富水性等。工作布置见图 1。

4. 综合地球物理解译

4.1. 重力资料解释

重力剖面测量是一种常规的物探手段, 它高效且不受电磁干扰, 在反映基岩起伏及断裂产状等方面效果明显^[6], 因而在城市及周边地区的地热勘探中被广泛使用。从项目区布格重力异常平面图上(图 2)可以看出, 全区大致呈现北部高重力异常向南部低重力异常过渡的趋势, 反映了地下基岩面埋深从北向南逐渐由浅变深。重力异常值的变化范围在-5.576 mGal~12.594 mGal, 差值达 18.17 mGal。在高异常区向低异

常区过渡的部位存在两条明显的北东向重力梯度带, 推断为两条断裂, 由此划分出三个北西-南东向分布的异常区域, 北西部异常值最高, 中间区域次之, 南部最低。在北部重力高值区域东部存在相对特高值区, 在中部低值异常区域西部存在相对低值区。据此可以推断, 就基岩埋深而言, 项目区北部存在一隆起区, 其南侧分布着由两条北东向断裂控制的两个基岩埋深陡降断块, 在北部隆起区东部存在相对的小凸起, 在中部断块西部存在相对小型凹陷区。项目区西部布格重力异常等值线出现扭曲, 推断存在一条北北西向断裂, 可能错断了两条北东向断裂。

4.2. 磁力资料解释

磁力资料可以用来研究控制地下热水资源的岩浆岩体的埋藏深度或火山岩的空间展布形态^[7]。从磁力异常等值线图(图 3)上可以看出整体异常大致呈现

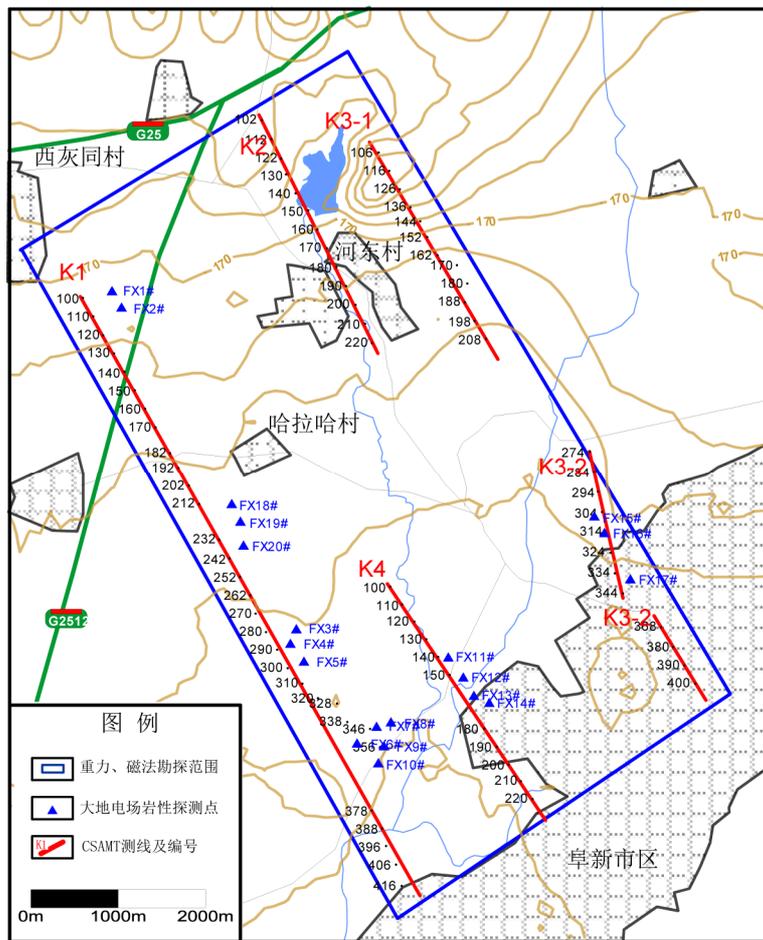


Figure 1. Map of design work
图 1. 工作布置图

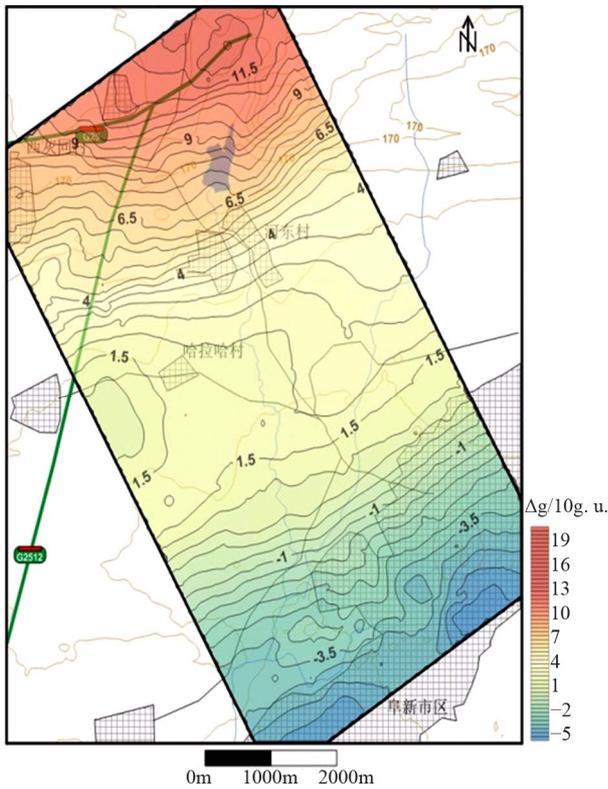


Figure 2. The contour map of Bouguer abnormal gravitation
图 2. 布格重力异常等值线图

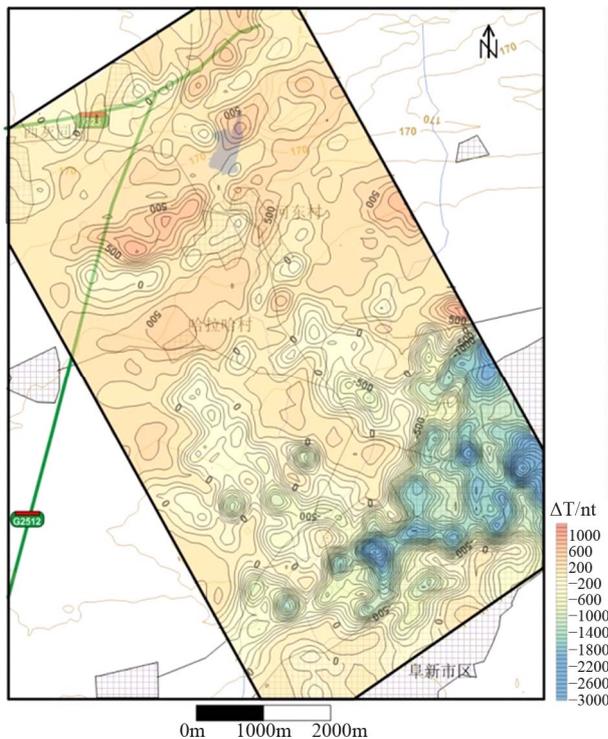


Figure 3. The contour map of magnetic anomaly
图 3. 磁力异常等值线图

西北高东南低的趋势, 其中西北高磁异常区对应于郊区位置, 该区受干扰物的影响较小, 可靠性高, 推断高磁异常是火山岩岩性的反映。东南扇形低磁异常区位于阜新市矿工大街、迎宾大街周围, 小区、车辆、建筑物较多, 野外采集的数据上下波动较大, 受人为因素干扰太多, 可靠性低。但总体看来, 项目区东南部存在负磁性的低磁性体, 且埋深较大, 客观上也反映出本区火山岩埋深北浅南深, 为一单斜构造。

4.3. 重力、磁力、CSAMT 综合剖面解释

CSAMT 法是以有限长接地电偶极子为场源, 在距偶极中心一定距离处同时观测电、磁场参数的一种电磁测深方法, 因其具有抗干扰性强、探测深度大、横向分辨率高等优点而在地热勘查领域中被广泛应用^[8-11]。

本次工作将 CSAMT 剖面位置处的重力和磁力信息从图 2、图 3 中提取, 绘制了相对重力布格异常值曲线、重力一阶水平导数曲线和磁力 ΔT 曲线图, 与 CSAMT 二维反演断面图一起, 综合分析确定断裂构造位置及地层结构。以 K1 剖面为例说明。K1 剖面位于项目区西侧, 测线方位角 148° , 综合剖面图见图 4。由图可知, 相对布格重力异常值和磁力 ΔT 值均大体上呈现自北西向南东降低的现象, 反映了基岩面北高南低的总体趋势。由 CSAMT 反演电阻率断面图可见, 电阻率总体呈现浅部低阻、深部高阻现象。浅部低阻层推断为白垩系砂岩、泥岩, 平均厚度 1000 m; 中部相对高阻层推断为侏罗 - 白垩系砾岩、玄武岩、安山岩, 平均厚度 400 m; 深部高阻层推断为蓟县系雾迷山组白云岩。深部电阻率等值线横向上的高低起伏大致反映了雾迷山组顶板埋深的变化。在 CSAMT 反演图的 110 号点附近, 电阻率等值线密集陡倾; 相同位置处的重力测量曲线图上 13 号点布格重力一阶水平梯度呈现高值, 因此综合推断此处存在断裂, 命名为 F1; 在 CSAMT 反演图的 290 号点附近, 电阻率横向变化大, 呈现等值线密集带; 相同位置处的重力测量曲线图上 163 号点, 布格重力一阶水平梯度出现局部高值, 综合推断此处也应存在断裂, 命名为 F2。结合区域地质资料, 推断断裂两侧基岩地层层序均为白垩系孙家湾组(K₂s)、侏罗 - 白垩系义县组(JKy)和蓟县系雾迷山组(Jxw)。

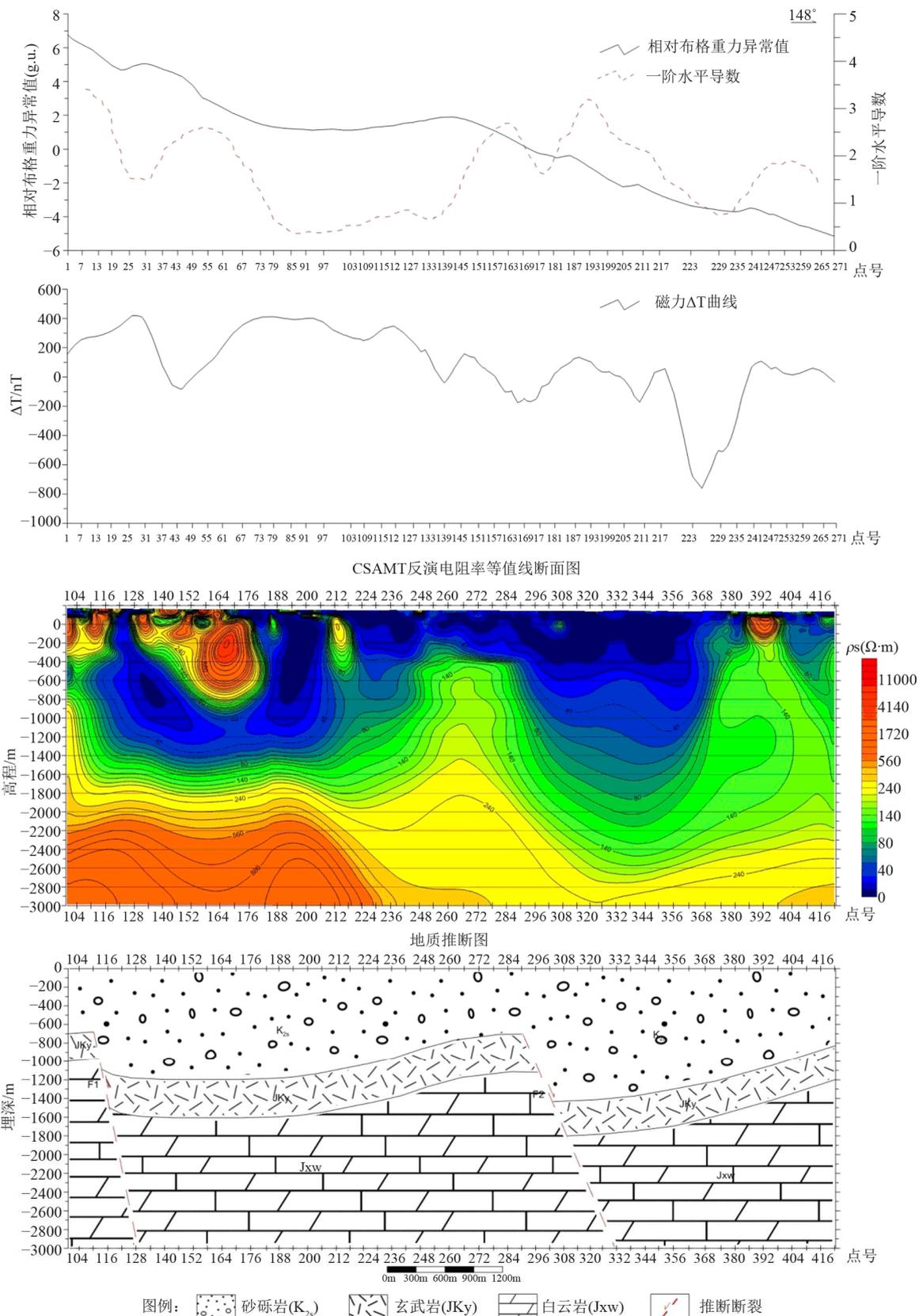


Figure 4. Integrated profile of geophysical and geological survey along "K1"
图 4. K1 测线物探、地质综合解释断面图

4.4. 大地电场岩性探测资料解释

大地电场岩性探测技术是20世纪90年代发展起来的一种物探方法,它是通过接收日-地空间中的电磁波在地下不同深度介质界面所产生低频反射电磁场信息,判断与识别地下介质界面一种方法。

在岩性界面、断层、油气层、含水层等部位,大地电场岩性探测曲线均会有所显示,从而可达到找油、找水的目的^[12]。该方法具有垂直分辨率高的特点,本次工作垂向分辨率为2 m。所获得的大地电场岩性探测资料显示,FX13#、FX15#、FX19#点富水性较好。其中FX13#点共8层储水层,主力储水层应为第一、二、四、五、六层;FX15点共10层储水层,主力储水层应为第一、二、三、四、八、九、十层;FX20#点共8层储水层,主力储水层应为第一、二、三、四、七层。如表2所示,这三个点的主要含水层分别在1500 m、2100 m和2000 m以内。

4.5. 综合推断解释

项目区北部为一隆起区,向南分布着两个断块,隆起区与中部断块间由于近北东向断裂(F1)作用,基岩面陡降,断裂两侧落差较大;断块内存在另一条北东向断裂(F2),使项目区南侧断块基岩埋深进一步加大。北部隆起区东部存在小型凸起,在中部断块西部存在小型凹陷区。F1断裂所在的K1剖面110号点与由K2剖面的194号点和K3-1剖面的148号点组接的

断裂连线有偏离,F2断裂所在的K1剖面290号点与由K3-2剖面的294号点和K4剖面的146号点组接的断裂连线也有相似的偏离,同时在布格重力异常平图上,项目区左侧尤其是偏北部有明显的等值线扭曲;因此综合推断项目区西部存在一条北西向断裂,命名为F3,该断裂错断了两条北东向断裂(见图5)。F1、F2断裂倾向南东,断裂性质为张性;F3断裂倾向北东。

在勘查深度范围内,项目区地层自上而下发育有第四系(Q)、白垩系孙家湾组(K₂S)、侏罗-白垩系义县组(JKy)和蓟县系雾迷山组(Jxw)。各时代地层总体倾向东南。推断热储盖层为第四系松散沉积物和中生界白垩系孙家湾组砂砾岩、砂岩及泥岩;盖层在项目区南部较厚,其厚度一般大于1000 m。根据处于同一个地质构造单元的已经施工完毕的项目区周边地热井“阜新市东门外地热井(DR1)”和“东梁地热井(DR3)”资料,确定项目区热储层有两套,其一为侏罗-白垩系义县组玄武岩、安山岩等,其二为中元古界蓟县系雾迷山组含砂屑白云岩、厚层燧石条带白云岩。热储层埋深北浅南深,在构造有利部位裂隙岩溶发育,富水性好。

Table 2. The aquifer depth at the points of land electrotelluric lithological detection
表 2. 大地岩性探测点含水层分布深度(m)

层号	FX13#	FX15#	FX19#
第一层	340~344	275~280	370~375
第二层	880~885	1110~1115	985~990
第三层	1050~1055	1175~1180	1260~1265
第四层	1205~1210	1295~1300	1315~1319
第五层	1300~1305	1405~1409	1380~1385
第六层	1340~1345	1620~1624	1675~1679
第七层	1430~1435	1855~1859	1845~1850
第八层	1905~1910	1950~1955	1875~1879
第九层	-	2020~2025	-
第十层	-	2065~2070	-

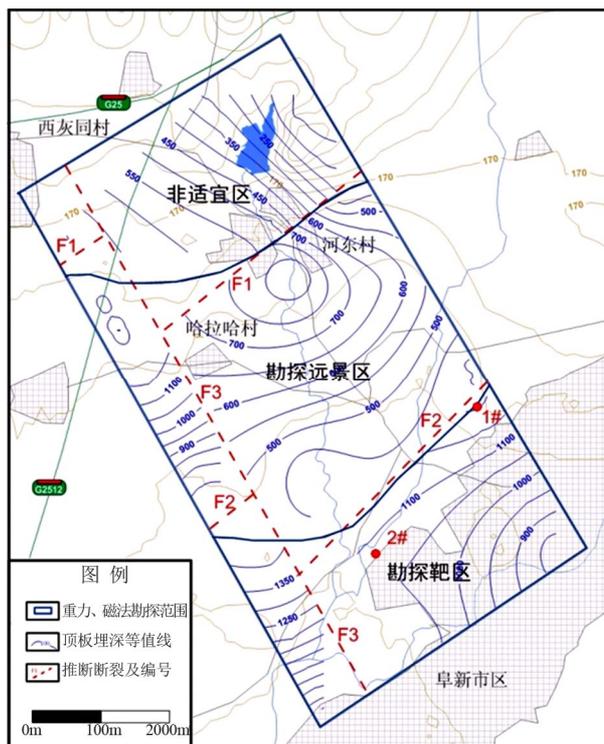


Figure 5. The result map of integral survey
图 5. 综合勘探成果图

5. 地热资源勘探靶区的确定

利用综合剖面所推断的地层深度界线, 可以绘制出两个热储层的顶板埋深等值线; 利用已知地热井资料^[13], 计算出项目区地层平均地温梯度为 $2.8^{\circ}\text{C}/100\text{m}$, 进而可以求出热储层顶板温度范围。综合考虑断裂构造位置、热储层埋深及富水性等条件, 将项目区分为三个级别的地热勘探区块, 由北向南分别为非适宜区、勘探远景区和勘探靶区(图5)。上部侏罗-白垩系火山岩命名为第一热储层, 下部蓟县系雾迷山组白云岩命名为第二热储层。

北部基岩埋深较浅, 盖层薄, 地下水温度低, 大地电场岩性探测资料也显示该区地层富水性一般, 因此不适于进行地热资源勘探开发, 为“非适宜区”, 其面积 10.65 km^2 。中部第一热储层顶板埋深 $400\sim 1200\text{ m}$, 推断热储层顶板温度 $16^{\circ}\text{C}\sim 39^{\circ}\text{C}$, 第二热储层顶板埋深 $800\sim 1600\text{ m}$, 推断热储层顶板温度为 $27^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$, 该区块热储盖层有一定厚度, 布置在推断 F3 断裂附近的大地电场岩性探测点 FX19#显示含水层富水性较好, 说明在构造有利部位, 该区能够获得一定温度的地下热水, 为“勘探远景区”, 其面积 19.13 km^2 。南部第一热储层顶板埋深 $700\sim 1400\text{ m}$, 推断热储层顶板温度 $25^{\circ}\text{C}\sim 44^{\circ}\text{C}$, 第二热储层顶板埋深 $1100\sim 1800\text{ m}$, 推断热储层顶板温度为 $36^{\circ}\text{C}\sim 56^{\circ}\text{C}$, 该区块热储盖层相对较厚, 储热条件较好; 布置在推断 F2 断裂附近的大地电场岩性探测点 FX13#、FX15#均显示, 地层富水性好, 说明在构造有利部位, 能够获得相对较高温度的地下热水, 这一区域为地热资源的“勘探靶区”, 是进一步工作的重点, 其面积 12.05 km^2 。

为指导下一步钻探施工, 在勘探靶区内有物探工程控制的点位, 靠近断裂带附近, 确定了两眼拟钻井, 其中1号井选择在大地电场岩性探测点 FX13#位置, 设计井深 1500 m , 目的热储层是侏罗-白垩系义县组; 2号井选择在大地电场岩性探测点 FX15#位置, 设计井深 2100 m , 目的热储层是蓟县系雾迷山组。

6. 结语

本次工作采用了重力、磁力勘探、可控源音频大地电磁测深及大地电场岩性探测四种物探方法, 综合推断出阜新市四合地区的构造和地层特征, 确定了地热资源勘探靶区, 绘制了两套热储层的顶板埋深等值

线, 计算了顶板温度, 并给出了设计勘探井位。综合物探方法在地热资源普查中发挥了较好的先行作用, 有力地指导了下一步钻探工作的开展。

感谢北京市地质勘察技术院于浚高级工程师对本文提出的建设性参考意见。

参考文献 (References)

- [1] AXELSSON, G. Sustainable geothermal utilization—Case histories; definitions; research issues and modeling. *Geothermics*, 2010, 39(4): 283-291.
- [2] 庞忠和, 胡圣标, 汪集旸. 中国地热能发展路线图[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 18-24.
PANG Zhonghe, HU Shengbiao and WANG Jiyang. A roadmap to geothermal energy development in China. *Science & Technology Review*, 2012, 30(32): 18-24. (in Chinese)
- [3] 杨辉, 戴世坤, 宋海斌, 等. 综合地球物理联合反演综述[J]. 地球物理学进展, 2012, 17(2): 262-271.
YANG Hui, DAI Shi kun, SONG Haibin, et al. Overview of joint inversion of integrated geophysics. *Progress in Geophysics*, 2012, 17(2): 262-271. (in Chinese)
- [4] 汪集旸, 熊亮萍, 庞忠和. 中低温对流型地热系统[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 6-10.
WANG Jiyang, XIONG Liangping and PANG Zhonghe. Low-medium temperature geothermal system of convective type. Beijing: Science Press, 1993: 6-10. (in Chinese)
- [5] 刘光鼎. 论综合地球物理解释——原则与实例[A]. 八十年代中国地球物理学进展[C]. 北京: 学术书刊出版社, 1989: 231-242.
LIU G. D. Principles and applications of integrated geophysical interpretation. In: Chinese Journal of Geophysics Eds., *Progress of Chinese Geophysics in 1980s* (in Chinese). Beijing: Scientific Books and Periodicals Press, 1989: 231-242. (in Chinese)
- [6] 田舍, 宋雨辰. 剖面重力高阶水平导数在地热勘查中的应用[J]. 勘探地球物理学进展, 2006, 29(5): 373-376.
TIAN She, SONG Yuchen. Application of higher order horizontal derivatives of profile gravity in geothermal investigation. *Progress in Exploration Geophysics*, 2006, 29(5): 373-376. (in Chinese)
- [7] 李建军, 张许平, 刘鸿福. 磁法与测氡法结合寻找地热资源[J]. 物探与化探, 2006, 30(4): 289-292.
LI Jianjun, ZHANG Xuping and LIU Hongfu. The combination of magnetic method and radon surveying method in search for geothermal resources. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2006, 30(4): 289-292. (in Chinese)
- [8] 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]. 物探化探计算技术, 2007, 29: 60-63.
HUANG Lijun, MENG Yinsheng and LU Guifu. An application of CSAMT sounding to exploration of deep geothermal resources. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2007, 29: 60-63. (in Chinese)
- [9] 刘瑞德, 黄力军, 孟银生. 可控源音频大地电磁测深法在地热田勘查中应用效果初探[J]. 工程地球物理学报, 2006, 4(2): 86-89.
LIU Ruide, HUANG Lijun and MENG Yinsheng. Application of controlled source audio-frequency magnetotellurics to exploration in the geothermal field. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2006, 4(2): 86-89. (in Chinese)
- [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 Shouyun, LI Baixiang, ZHOU Xiaobo, et al. The applica-

- tion of the remote-sensing and electric methods to geothermal water exploration. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2013, 37(2): 229-232. (in Chinese)
- [11] 邓国泉, 程云涛. CSAMT 在福建贵安地热勘查中的应用[J]. *物探与化探*, 2011, 35(6): 751-754.
DENG Guoquan, CHENG Yuntao. The application of CSAMT to the exploration of geothermal resources in Gui'an, Fujian Province. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2011, 35(6): 751-754. (in Chinese)
- [12] 柯柏林, 丁连靖, 冉伟彦, 等. 大地电场岩性探测技术在北京地热勘查中的应用[J]. *技术应用*, 2007(1): 42-46.
KE Bailin, DING Lianjing, RAN Weiyan, et al. Applications of the land electrotelluric lithological detection technique in Beijing's geothermal exploration. *Technology Applications*, 2007(1): 42-46. (in Chinese)
- [13] 张俊宝. 阜新盆地东梁区地热资源赋存条件分析[J]. *中国煤田地质*, 2003, 15(6): 37-39.
ZHANG Junbao. Geothermal resources hosting condition analysis, Dongliang District, Fuxin basin. *Coal Geology of China*. 2003, 15(6): 37-39. (in Chinese)