

天津东丽湖深部岩溶热储时频电磁法探测 及有利区预测

程正璞,雷 鸣*,李 成,连 晟,魏 强

(中国地质调查局水文地质环境地质调查中心,河北 保定 071000)

摘 要:天津市地热资源储量丰富,蓟县系雾迷山组作为主力热储,是典型的碳酸盐岩型热储层。为查明天津东丽湖5 km以浅的地层结构和隐伏断裂、重点查明深部主力热储层空间分布及结构特征、预测地热有利区,笔者首次将主要用于深部油气勘探的时频电磁法应用于东丽湖深部地热资源探测。通过高标准的数据采集、精细化数据处理和电阻率约束反演,结合地震和钻孔资料进行层位标定,精细刻画了地层结构:推断了7条隐伏断裂,均为NNE与NNW向的拉张性正断层,其中沧东断裂F1作为区内主要热流体的必要通道,导热、储热并控制着地热异常区的分布和形态;雾迷山组热储层主要分布在沧东断裂西侧,顶界面埋深海拔约-2 200~-2 400 m,在电阻率剖面上显示为连续递增的A型电性特征,三、四段岩溶裂隙较发育时,热水在裂隙或断裂处的聚集引起局部低电阻率异常,出现H型电性特征,指示了目标深度内地热有利区的发育部位。据此,本文圈定地热有利区4处,为后续地热资源的开发利用提供了重要的基础资料和支撑。

关键词:时频电磁法;深部岩溶热储;雾迷山组;地热有利区;天津东丽湖

中图分类号:P314;P631.325

文献标识码:A

文章编号:2097-0188(2023)02-0001-08

天津市地热资源储量丰富、开发利用程度高,蓟县系雾迷山组三、四段白云岩热储是目前的主力开采层位,由于开发强度不断增大,部分地区开采潜力已达极限^[1-2]。随着钻探技术的不断进步和清洁能源需求的持续增长,向地球深部进军,探测深部地热资源、开辟深部热储第二空间、增加可开采资源量,成为保障天津地区地热可持续发展的有效途径之一^[3]。

多年来,专家学者在天津东丽湖及周边开展了一系列水文地质调查、地球化学、地球物理探测、数值模拟、钻井工程和钻孔测温工作,在区域构造、热储特征、储集空间类型、水源补给、水化学特征、地热资源储量等方面形成了一定认识和成果^[4-17],但系统的关于东丽湖深部地热地球物理探测的文章鲜有报道。

2017年以来,中国地质调查局在天津东丽湖地区部署了深部地热探测工作,开展了时频电磁法和二维地震相结合的勘查方法,着力探明地下5 km以浅精细地质结构,查明主要断裂构造特征,初步摸清

深部热储的空间分布状况,为深部地热资源评价、地热参数井孔位论证提供地质依据。其中时频电磁方法首次应用到地热勘查领域,较传统电磁方法,在应对强电磁干扰方面具有一定优势^[18-20],本文主要介绍时频电磁法技术在深部热储探测中的应用成果。

1 研究区地质概况

东丽湖地区位于天津市东部,隶属于天津市东丽区,位于IV级构造单元潘庄凸起上(图1),其东侧边界为沧东断裂、西侧边界为天津断裂、北侧边界为汉沽断裂、南侧边界为海河断裂,发育有著名的山岭子地热田,2011年年底被国土资源部评为“中国温泉之乡”,年可采资源储量为 $224.36 \times 10^4 \text{ m}^3$ 。

依据研究区内地热井的钻探资料,揭露的地层从新到老为:新生界(第四系和新近系)、古生界(奥陶系和寒武系)、中新元古界(青白口系和蓟县系),区内已发现新近系明化镇组、新近系馆陶组、奥陶系和蓟

收稿日期:2023-03-21

资助项目:国家重点研发计划课题“深部热储地球物理探测技术联合研究”(2020YFE0201300)及中国地质调查局项目“天津东丽区-河北牛驼镇地热资源调查与试验”(DD20190127)、“东部地区干热岩资源调查评价”(DD20221680)

作者简介:程正璞(1990-),男,工程师,硕士,毕业于中国地质大学(武汉),现主要从事电磁法数据采集、处理与解释及深部地热勘查综合研究,E-mail:czp1990@126.com。*通讯作者:雷鸣(1978-),男,工程师,本科,毕业于中国地质大学(北京),主要从事水工环、地热等综合物探研究,E-mail:1417377287@qq.com。

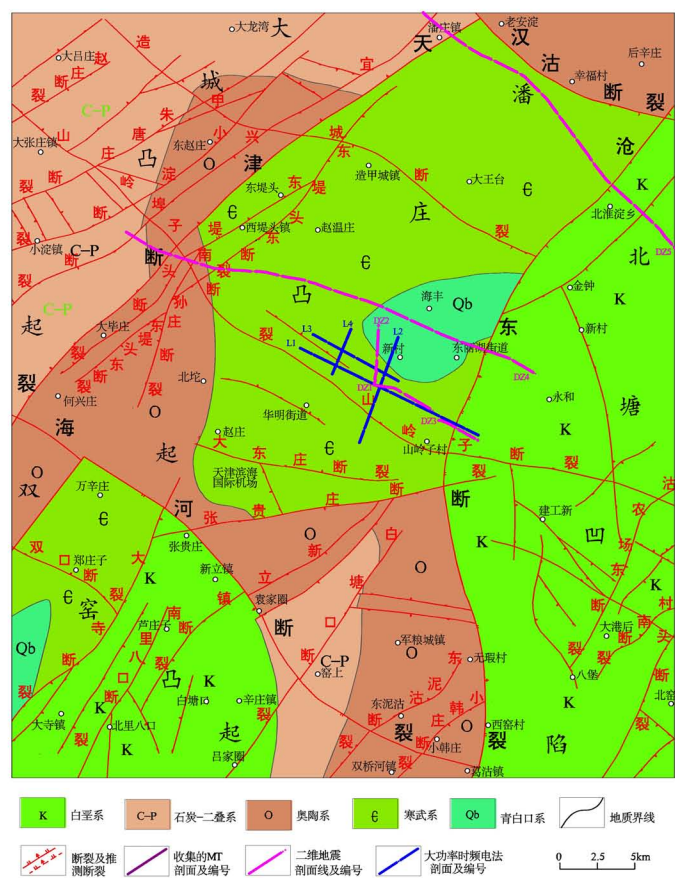


图1 研究区地质结构及测线部署图

Fig.1 Geological structure and survey line deployment map of the study area

县系雾迷山组三、四段4个热储^[3]。该热储层单井出水量为70~120 m³/h,最大可达204 m³/h,出水温度为88~102℃,水化学类型为Cl·HCO₃·SO₄-Na或Cl·SO₄·HCO₃-Na型,总矿化度为1 670~2 200 mg/L,总硬度为120~240 mg/L(以CaCO₃计),pH值为7.3~8.4,富含氟、偏硅酸、偏硼酸、溴、碘、锂、锰等多种对人体有益的微量元素和化学成分^[1,15]。地热资源广泛

应用于供暖、温泉洗浴、养生理疗、康乐旅游、矿泉水开发等领域,地热资源勘查开发利用均处于较高的水平。

中国地质调查局、天津市地质调查研究所、天津地热勘查开发设计院等多个单位在天津地区开展了一系列地热地质调查和地球物理探测工作,结合研究区已有相关工作成果和文献资料^[21-24],统计分析热储层和盖层的综合物性参数特征见表1。研究区盖层主要类型为新近系砂岩孔隙型热储和基岩碳酸盐岩溶裂隙型热储。

(1)新近系砂岩孔隙型热储:该热储层波速平均值为2 021 m/s,而其上覆第四系波速值一般<1 300 m/s,两者间波速差异明显;热储层电阻率值为1~20 Ω·m,与上覆第四系电阻率值差异较小。

(2)基岩碳酸盐岩溶裂隙型热储:该热储层波速平均值的范围为2 681~2 732 m/s,为高速层,与上覆地层波速差异十分明显;电阻率值一般>100 Ω·m,为高阻层,与上覆地层电阻率差异明显,为电磁法和地震勘探提供了物理基础。

2 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^[25],实现了时间域电磁法和频率域电磁法的统一^[26]。

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之间,布置地点一般选择在潮湿且远离强电力干扰的地方,通过多根电缆并联到TFEM-T3型大功率(200 KW)

表1 研究区盖层及热储层物性参数

Table 1 Physical parameters of caprock and thermal reservoir in the study area

地层年代	代号	岩性	波速 /(m/s)	电阻率/ (Ω·m)	电性特征描述	属性
新生界	第四系	Q 黏土、粉细砂互层	100~1 309	1 ~ 15	低阻	盖层
	新近系	Nm ² 砂岩为主,与泥岩互层	2 021	8 ~ 70	中阻	砂岩热储,孔隙型
		Nm ¹ 泥岩为主,与砂岩互层		1 ~ 15	低阻	
		Ng 砂砾岩		5 ~ 30	高于明化镇组下段,但总体表现为中低阻	
		古近系		E 灰色砂岩夹泥岩	1 ~ 10	
古生界	奥陶系	O 灰岩	2 681	50 ~ 90	相对高阻	隔层
	寒武系	Є 灰岩、白云岩为主				灰岩热储,岩溶裂隙型
	青白口系	Qb 泥灰岩、灰岩为主				2 209
中、新元古界	蓟县系	Jx 白云岩为主	2 732	>100	高阻	白云岩热储,岩溶裂隙型,主力储层

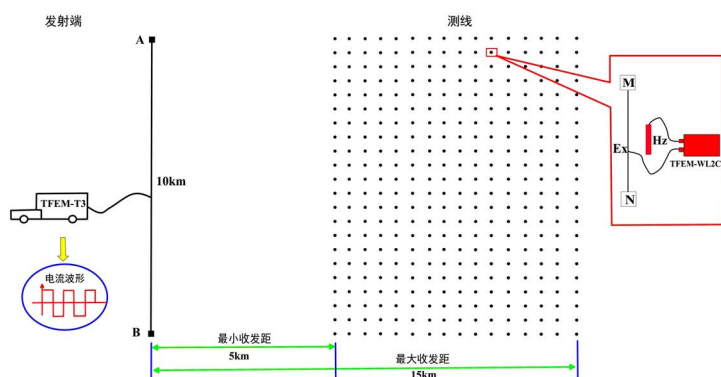


图2 时频电磁法野外施工示意图

Fig.2 Schematic diagram of TFEM exploration field construction

恒流时频电磁仪^[27]向地下供电;接收端多台WL2C-B型组网式采集站^[28]排列接收,布设在离发射源5~15 km的地方,通过接地线MN测量横向电场分量 E_x 和垂向磁场分量 H_z ,信号接收系统通过GPS与发射同步接收每个频率重复激发的所有信号。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。

由于时频电磁法采用大功率人工发射场源,与天然场相比,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、重复性好,对地下电性层的反应更真实、精细,可有效提高勘探精度^[29-30]。

研究区临近市区,区内人文干扰众多,如公路、光伏电场、高压线、村庄、工厂等,考虑到地热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^[31],但对碳酸岩界面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。

3 数据采集与处理

3.1 数据采集

笔者依托中国地质调查项目在天津东丽湖布设了4条时频电磁法测线,总长度为24.4 km,点距200 m,测线部署图见图1。

为确保采集到高品质的原始数据,施工过程中除严格执行《陆上可控源电磁法勘探采集技术规程》(SY/T 6589-2016)外,结合研究区实际情况,科学设计施工参数、强化施工质量控制,主要包括以下几点:

(1)仪器性能指标测试:开工前,所有参与施工接收仪器和测量仪器均进行了一致性试验,均方

误差均小于2%;同时对发射设备开展了内噪音测试($<0.5 \mu V$)、谐波测试($<0.007\%$)、正弦波测试(波形完好),均符合技术规程所要求的性能指标。

(2)优选发射端施工参数:通过室内正演模拟及开工前收发距试验结果,技术人员确定了本研究区最佳收发距范围为7~10 km,供电电极A、B之间的距离范围为6~10 km,激发频率范围为40~0.025 Hz,激发波形为不过零方波,占空比1/1;发射端接地电阻不大于 15Ω ,实发电流不小于80 A;A、B连线与测线接近平行,两者之间的夹角不大于 3° 。

(3)合理设计测点位置:技术人员通过踏勘分析确认了研究区内的干扰源位置及类型,提前利用高清卫星软件对测点进行了展绘,尽量远离干扰源,选择地势平坦开阔位置放样;测点的分布比较均匀,没有出现突拐现象,测量标识醒目且不易被移动。

(4)测点布设与数据采集:沿测线方向布设M、N,受地形地貌影响,MN距离范围为80~100 m,MN距和方位均采用RTK实测,两极的定位误差小于1%,方位误差小于 1° ;M、N处理设不极化电极罐,与泥浆接触良好,接地电阻不大于 2000Ω 、自然电位不大于20 mV,连接采集站且静置20分钟后开始采集至少1分钟的背景噪声数据;而后,发射端开始激发,采集 E_x 电场分量数据,发射结束后,断采集站,利用局域网导出激发电流数据和测点观测数据,备份保存并及时转交室内处理人员。

3.2 数据处理与解释

时频资料处理与解释有一套比较完善的流程^[32-33],结合研究区噪音干扰情况及勘查目标特点,主要采取如下技术:

(1)数据预处理技术:包括原始时序信号核查、数据品质和噪声水平评价、50 Hz工业噪声估计和自动删除干扰大的某一个周期信号、同步叠加等;同时对数据进行格式转换,建立测区数据库。

1)原始时序信号核查:利用SignalView软件查看激发电流和 E_x 电场时序文件,检查时序文件中采集参数(AB长度、MN长度、波形类型、场分量类型、增益、模数转换系数)。

2)数据品质和噪声水平评价:数据质量评价需要有实时性,当完成野外数据采集后,需要对数据进行质量评价,分析噪声情况,通过计算出的质量因子

决定是否重新进行数据采集^[32],质量合格方可进行处理运算。

3)50 Hz工业噪声估计和自动删除干扰大的某一个周期信号:50 Hz噪声估计是对每个周期的信号做时窗快速FFT变化,提取出45~55 Hz的功率谱,然后计算这些功率谱的中值,把这个值作为50 Hz值的功率谱。完成50 Hz噪声估计后,根据干扰情况用数字滤波的方法压制50 Hz的工业干扰,可采用的滤波器有带通、带阻、三角滤波器。单个周期的信号质量影响多个周期叠加后的数据质量,因此需要预处理删除噪声大的周期信号。自动剔除坏周期的思路:①计算每一个重复发射周期信号的1、3、5次谐波的振幅和相位及其中值振幅和相位;②计算每个周期的振幅和相位与中值振幅和相位之间的差值,若相对差值都大于设定的误差标准,则删除该周期的信号。

4)数据叠加处理:叠加是指对接收到的多个周期相同基波的时序数据进行叠加,然后除以叠加次数,形成一个周期的数据,可进一步提高信噪比,其数据信噪比能够提高的倍数为叠加次数的平方根。

(2)电性参数提取技术:包括建立数据库、电流归一化、去除干扰频点和畸变点、求取振幅和相位数据。

1)建立数据库:原始数据在FFT变换后,得到激发电流和测点观测数据的实分量、虚分量、坐标数据,为了便于资料的处理与分析,需要建立一个包含所有信息的数据库;建立数据库后,可以按照测线、发射源、频率、测点等采集参数单独显示或一起显示,所有定性参数的处理均在数据库基础上完成。

2)电流归一:是指发射电流的归一化,即计算发射电流为1 A时采集站记录到的电场振幅和相位,然后用计算出的振幅除以发射电流的振幅,用计算出的相位减去发射电流的相位。

3)去除干扰频点和畸变点:通常通过滤波或者手动删除方法进行,当实测数据中存在明显的干扰或畸变且通过常规的滤波方法无法改善数据质量时,采用Spline滤波、最小二乘曲线拟合或者手动编辑的方法删除畸变信号,改善数据质量。

4)求取振幅和相位数据:经过叠加处理后得到某个频率的基波时序信号,频率域处理中需要对这一个周期基波信号做时窗快速傅氏变换(FFT),得到该频率信号的基波及奇次谐波(3、5)的振幅和相位。

(3)约束反演技术:为了更准确地刻画和突出深层地热异常,本文利用GeoGME重磁电震数据处理

解释系统,在资料处理时采用了基于井(钻井、测井)、地震资料建模的约束反演技术^[34]。具体过程是充分利用地震、钻井和地质等已知信息,建立地质模型;利用电测井资料的统计结果给出每层电阻率的约束范围,并以每一层电阻率平均值作为地层的初始电阻率值进行反演拟合。反演过程中通过不断改变各地层电阻率值来拟合每个频率的振幅,达到最佳拟合时的电阻率值就是最终地电模型,从而将时频电磁资料中反映构造信息的电阻率背景确定下来。

(4)综合解释技术:包括地层标定、断裂解译、热储分布特征等。

1)地层标定:通过分析岩石物性和电测井资料,得到地层宏观垂向电性结构,对约束反演剖面进行地层标定,从而建立不同地层与时频电磁电性异常的对对应关系,构建地质电阻率模型,进行综合分析和解释。

2)断裂解译:断裂构造往往造成地层的纵向错位和横向平移,当达到一定规模时,由于断裂构造两侧的地层存在电阻率差异,从而引起一定规模的电阻率异常的变化,断裂的解释依据主要包括:①时频电磁电阻率反演剖面上等值线的纵向扭曲、电性轴的错断、同一电性层厚度突变等;②地震解释的断裂、地面地质显示的断裂。

本次断裂解释以时频电磁法资料为主,地震资料为辅,并结合研究区以往工作成果,对断裂进行综合推断解释。

3)热储分布:通过对研究区地热条件以及构造演化、盖层保存条件的分析,结合断裂分布特征与新生界、古生界、中新元古界地层的平面构造特征,重点查明5 km深度范围内主力热储层空间分布特征,并依据热储岩层厚度的分布、埋深以及断裂构造,预测地热有利区。

4 综合解释

4.1 典型反演电阻率剖面

本次通过时频电磁01测线二维反演电阻率剖面(图3),结合临近DZ1、DZ3地震勘探成果、CGSD-01、CGSD-02钻孔及测井等资料^[3],对01线电阻率反演剖面进行层位标定,刻画了地下5 km以浅的地层结构。

依据图3所示的电阻率等值线形态特征,笔者推断出3条正断裂,分别为F1、F3、F4,均倾向东南,呈

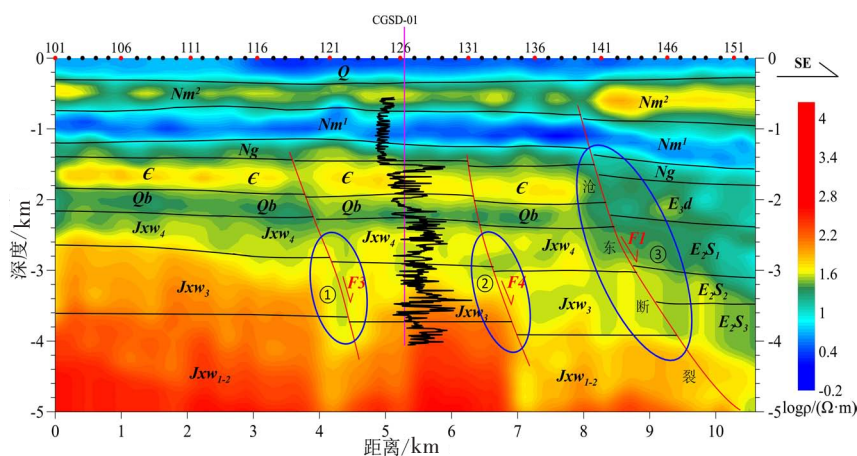


图3 L1测线二维电阻率反演结果图

Fig.3 2D resistivity inversion result of L1 survey line

叠瓦状排列。其中F1为沧东断裂,是研究区地层展布的主控断裂。

据CGSD-01钻遇地层情况和电测井资料^[3],F1断裂西侧,发育有新生界、古生界、中新元古界地层,宏观上随深度增加,电阻率也随之抬升,表现为A型电性特征,从上至下细分为“低-次高-低-中-次高-中-次高-高-极高”9个电性层,具体如下:

(1)新生界地层:该层包含第四系、新近系地层,电阻率整体为中低阻,表现为KH型电性特征。

其中:①表层低阻是第四系沉积盖层,岩性以黏土、粉细砂互层为主,地层底界面埋深约-300~-400 m,厚度约300~400 m,电阻率值约1~10 Ω·m;②第四系下伏地层为新近系明华镇组上段(Nm²),岩性以砂岩为主,地层底界面埋深约-650~-800 m,厚度约350~500 m,在电性上表现为次高阻,电阻率值约10~60 Ω·m;③下伏新近系明华镇组下段(Nm¹)岩性以泥岩为主,地层底界面埋深约-1 100~-1 250 m,厚度约400~600 m,在电性上表现为低阻层,电阻率值约2~15 Ω·m;④下伏中阻层为新近系馆陶组(Ng),岩性以砂砾岩为主,地层底界面埋深约-1 400~-1 550 m,厚度约200~400 m,电阻率值约10~30 Ω·m。

(2)古生界以下地层:古生界以下地层包含寒武系、青白口系、蓟县系地层,缺失奥陶系地层。整体电阻率为中高阻,相较于新生界地层要高,表现为HAA型电性特征;但局部也存在相对低阻,特别是断裂发育或地热发育的区域电阻率值更低。

其中:寒武系(ε)岩性以灰岩、白云岩为主,地层底界面埋深约-1 800~-2 050 m,厚度约400~600 m,在电性上表现为次高阻层,电阻率值约30~60 Ω·m;②

下伏青白口系(Qb)岩性以泥灰岩、砂岩为主,地层底界面埋深约-2 200~-2 400 m,厚度约250~350 m,电阻率值有所减小,表现为中阻层,电阻率值约20~40 Ω·m;③青白口系下伏地层为蓟县系雾迷山组,是研究区主力热储层,电阻率值随深度增加而逐渐增大,上部为蓟县系雾迷山组四段(Jxw₄)岩性以白云岩为主,据CGSD-01井揭示^[3],雾迷山组四段白云岩层系整体较破碎,钻井岩心中裂隙和溶蚀孔洞极其发育,为地下热水提供了良好的储集空间,因此在电性上表现为次高阻层,电阻率值约30~60 Ω·m,地层底界面埋深约-2 600~-3 000 m,厚度约500~600 m;④中部为蓟县系雾迷山组三段(Jxw₃)岩性以白云岩为主,据测井资料显示,其泥质含量较四段低,因此电阻率值较四段升高,整体表现为高阻层,电阻率值约40~150 Ω·m,地层底界面埋深约-3 600~-3 900 m,厚度约800~900 m;⑤下部为蓟县系雾迷山组一二段(Jxw₁₊₂),据测井资料显示,其泥质含量值较三段低,且二段上部的深侧向、浅侧向电阻率较三段底部高,因此二段电阻率值整体比三段升高,表现为极高电性层,电阻率值普遍大于100 Ω·m;此外,雾迷山组二段内部,自下而上,GR值、自然电位值、深侧向电阻率、浅侧向电阻率及测井解释的泥质含量呈逐渐变小趋势,表明随深度增加,电阻率值逐渐变大,表现为A型电性特征,这与电阻率剖面反映的趋势一致,证明了时频电磁法的有效性。

F1断裂东侧,地下5 km深度范围内主要发育新生界地层,整体电阻率值较F1西侧要低,表现为KHA型电性特征,从上至下可细分为“低-次高-低-中-次高-中-次高-高”8个电性层,依次对应第四系

(Q)、新近系明华镇组上段(Nm^2)、新近系明华镇组下段(Nm^1)、新近系馆陶组(Ng)、古近系东营组(E_3d)、沙河街组一段(E_2S_1)、沙河街组二段(E_2S_2)、沙河街组三段(E_2S_3)。

潘庄凸起构造区从上到下发育有两种类型的热储,即上部以砂砾岩为主的孔隙型热储和下部以灰岩、白云岩为主的岩溶裂隙型热储。孔隙型热储包括新近系和古近系热储层,岩溶裂隙型热储包括寒武系和蓟县系雾迷山组热储层。基岩热储层开发利用,以蓟县系雾迷山组热储为主。

图3中圈定的①②③区域均有断裂发育,且断裂由新近系延伸至雾迷山组地层中,储水带岩石受断裂影响会形成良好的破碎带,热水聚集后造成电阻率与围岩相比较低,出现H型电性特征,低阻异常不仅在横向上变化显著,在纵向上也有一定的延伸,因此推测①②③为岩溶发育异常区;同时③区域古近系地层发育,低阻异常发育连续向深部沿伸,也存在孔隙型热储发育区,所以③区域不仅发育有岩溶裂隙型热储也发育有孔隙型热储。③区域中发育有沧东断裂(F_1),为强径流带, F_1 断裂在上地壳浅部能将下部热储层高位热能以热对流形式传递到浅部,是地热勘探最为有利的区域。

4.2 地热有利区

由于研究区雾迷山组四段顶界面在-2 200 m以深,为圈定雾迷山组地热有利区,本文选取-2 400 m处的电阻率水平切片(图4),结合4条时频电磁二维反演电阻率剖面,本文推测出7条隐伏断裂,均为NNE与NNW向的拉张性正断层。其中 F_1 为沧东断裂,为一条NNE向的深大断裂,是区内主要热流体的一个必要通道,导热、储热并控制着地热异常区的分

布和形态; F_2 为山岭子断裂,为一条NNW向的盖层断裂,在断层东部、中部分布有多处基性火山岩体、中酸性岩体; F_3 、 F_5 、 F_6 、 F_7 断裂走向与 F_2 近平行或小角度相交,推测为 F_2 的次级断裂, F_4 断裂走向与 F_1 近平行,推测为 F_1 的次级断裂。

蓟县系雾迷山组三、四段为主要的岩溶裂隙型热储发育层,热水在岩层与断裂带的聚集会与周围岩层在电导、岩性、构造等方面有较大差异,热储有利区主要发育在断裂与深部次高阻岩溶发育处。因此在电阻率反演剖面上,明显的次高阻异常段,很有可能表征热储构造的存在。电阻率低阻异常与断裂的结合部位是地热勘探的有利目标区。

结合时频电磁法电阻率异常显示与断裂信息,本文推测圈定了四个地热有利区(图4蓝色框所示),依次为:

(1)区域1主要位于 F_5 断裂附近,包括L3测线106~115号点、04测线106~110号点。

(2)区域2主要位于 F_2 、 F_3 、 F_6 、 F_7 断裂附近,包括L1测线120~127号点、L2测线105~123号点、L3测线119~125号点。

(3)区域3主要位于 F_4 断裂附近,包括L1测线129~134号点。

(4)区域4主要位于 F_1 断裂附近,包括L1测线139~153号点。

其中区域1、2、3为雾迷山组(Jxw)有利区,区域4为古近系与雾迷山组有利区。

5 结论

通过对时频电磁测线的电阻率约束反演,并结合研究区地震和钻井资料进行了综合地质解释,得到以下结论:

(1)本文推测出7条隐伏断裂,均为NNE与NNW向的拉张性正断层。沧东断裂(F_1)是区内主要热流体的必要通道,导热、储热并控制着地热异常区的分布和形态。

(2)精细刻画了研究区地层结构,以沧东断裂(F_1)为界,地下5 km深度范围内,研究区西侧地层电阻率明显高于东侧,蓟县系雾迷山组主要分布在 F_1 西侧,顶界面埋深约-2 200~-2 400 m,四段厚度约500~600 m,三段厚度约800~900 m;电阻率值随深度增加而逐渐升高,表现为A型电性特征,一般大于100 $\Omega \cdot m$ 。

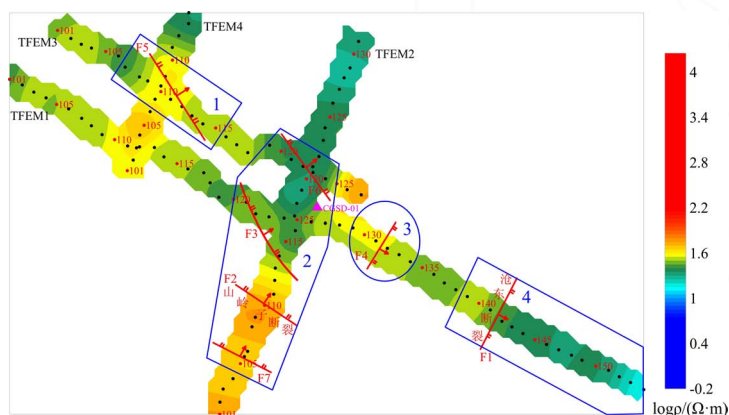


图4 研究区-2 400 m处电阻率水平切片图

Fig.4 Resistivity horizontal slice at -2 400 m of the study area

m,受断裂与地热发育影响,发育有局部低阻。

(3)蓟县系雾迷山组三、四段为主要的岩溶裂隙型热储发育层,热水在裂隙或断裂处的聚集引起局部低电阻率异常,出现H型电性特征,指示了目标深度内地热有利区的发育部位,据此圈定地热有利区4处。

(4)深部岩溶热储有良好的物理基础,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,在对地下含水体的低阻敏感性、断裂带富水性、连通性等方面有独特优势。结合地震、钻井、测井等资料,能够更加清晰地揭示深部地层结构、接触关系、隐伏构造的走向以及基岩面起伏形态;查明深部热储体的分布范围、岩性、厚度、埋藏深度、覆盖层的厚度等,可以圈定深部热储的展布范围;有效弥补深部地震反射信号较弱、信噪比低的不足,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,在城市强干扰区深部地热勘探方面值得大力推广应用。

(5)就研究区而言,现有时频电磁法测线较短且覆盖范围较小,对于断裂的规模、走向、构造研究存在局限性,后续工作应扩大勘查范围,加密测线距,进一步深化对研究区深部构造的认识。

(6)时频电磁法在地热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。

致谢:在本文成稿过程中,编辑老师及两位匿名外审专家提出了宝贵的修改意见,在此表示诚挚感谢!

参考文献:

- [1] 王继革,陈瑞军,易志东,等. 潘庄凸起奥陶系地热井施工风险分析[J]. 地质调查与研究, 2013, 36(1): 71-75.
- [2] WANG K. Background History and Status of Geothermal Utilization in Tianjin. Lectures on Geothermal Areas in China [R]. Reykjavik, 2008: 12-23.
- [3] 李胜涛,岳冬冬,冯昭龙,等. 天津东丽湖深部岩溶热储探测与储层参数研究及其开发利用潜力分析[J]. 中国地质, 2022, 49(6): 1732-1746.
- [4] 赵苏民,高宝珠,黎雪梅,等. 沧东断裂(天津段)特征及导水导热性质分析[J]. 地质调查与研究, 2007, 30(2): 121-127.
- [5] 刘赞,陈海波,冯树友,等. 沧东断裂潘庄凸起的东缘地热地质浅析[J]. 陕西水利, 2018, (5): 101-103.
- [6] 李胜涛,岳冬冬,张秋霞,等. 天津地区地热热源机制分析[J]. 地热能, 2019, (4): 3-9.
- [7] 阮传侠,沈健,李立亮,等. 天津市滨海新区东丽湖地区基岩热储回灌研究[J]. 地质通报, 2017, 36(8): 1439-1449.
- [8] 赵娜,王光辉,江国胜,等. 天津东丽湖地区地热流体地球化学特征及其赋存环境[J]. 地质找矿论丛, 2016, 31(1): 142-146.
- [9] 王卫星,孙玉东,杨永江,等. 天津市东丽湖地热对井的地质与水文地球化学特征[J]. 物探与化探, 2010, (1): 44-48.
- [10] 胥博文,刘志龙,叶高峰,等. 宁河凸起地热资源远景区评价分析——来自大地电磁测深法的证据[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(6): 2278-2284.
- [11] 米晓利. 大功率时频电磁法在城市干扰区地热勘查试验及效果[A]. 2019年中国地球科学联合学术年会[C], 2019.
- [12] 程万庆,高亮,胥博文,等. 天津桥沽—看财庄地热田地球物理勘查[J]. 地质调查与研究, 2012, (4): 304-309.
- [13] 李婧玮. 天津东丽湖区基岩地下热水的三维非稳定流数值模拟[D]. 北京:中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 2015.
- [14] 江国胜,孙晓林,冯树友,等. 天津地热钻孔中奥陶系各组分层划分的方法探讨[J]. 地质调查与研究, 2017, 40(3): 238-241.
- [15] 林黎,赵苏民,阮传侠,等. 天津地区深部蓟县系雾迷山组热储岩溶非均一性特征研究[J]. 现代地质, 2007, 21(4): 600-604.
- [16] 刘东林,闫佳贤,田光辉,等. 基于TOUGH2.0东丽湖地区雾迷山组热储资源潜力评价[J]. 工程勘察, 2015, 43(8): 52-57.
- [17] 彭展翔. 天津市东丽湖地区雾迷山组地热回灌数值模拟及地热资源评价[D]. 北京:中国地质大学(北京)水资源与环境学院, 2016.
- [18] 周印明,胡晓颖,张兆芳,等. 时频电磁法在探测煤矿富水地质异常体中的应用[A]. 中国地球物理学会第二十九届年会[C], 2013.
- [19] 周印明,刘雪军,张春贺. 快速识别页岩气“甜点”目标的时频电磁勘探技术及应用[J]. 物探与化探, 2015, 39(1): 60-63.
- [20] DONG WB, ZHAO M, LIU F, et al. The time-frequency electromagnetic method and its application in Western China[J]. Applied Geophysics, 2008, 5: 127-135.
- [21] 高昌. 天津市深覆盖地区 1:50000 区域地质调查综合物探研究报告[R]. 天津市地质调查研究所, 2003.
- [22] 李俊峰,李丹,林黎,等. 天津市周良庄地热田地热资源普查报告[R]. 天津地热勘查开发设计院, 2006.
- [23] 林黎,王坤,林建旺,等. 天津市深部地热资源普查报告[R]. 天津地热勘查开发设计院, 2000.
- [24] 杨玉新,刘九龙,张文静,等. 综合物探方法在天津地区地热勘查中的应用[J]. 世界地质, 2009, 28(3): 351-360.
- [25] 何展翔. 人工源时间频率电磁测深方法, 专利受理号 03150098.6, 授权专利号 ZL03150098.6.

- [26] 何展翔,陈忠昌,任文静,等.时频电磁(TFEM)勘探技术:数据采集系统[J].石油地球物理勘探,2020,55(5):1131-1138.
- [27] 庞恒昌,高华.大功率恒流时频电磁仪[J].物探装备,2009,(201):49-53.
- [28] 穆群英,魏启,庞恒昌,等. TFEM组网式时频电磁采集系统组成及功能[J].物探装备,2017,27(1):67-70.
- [29] DONG WB, ZHAO M, LIU F, et al. The time-frequency electromagnetic method and its application in Western China[J]. Applied Geophysics, 2008, 5: 127-135.
- [30] HE ZX, SUO XD, HU ZZ, et al. Time frequency electromagnetic method for exploring favorable deep igneous rock targets: a case study from north Xinjiang[J]. Journal of Environmental and Engineering Geophysics, 2019, 24(2):215-224.
- [31] 张春贺,刘雪军,何兰芳,等.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,2013,(9):3173-3183.
- [32] 王志刚,何展翔,覃荆城,等.时频电磁技术的新进展及应用效果[J].石油地球物理勘探,2016,(A1):144-151.
- [33] 何展翔,董卫斌,赵国,等.时频电磁(TFEM)技术:数据处理[J].石油地球物理勘探,2021,56(6):1391-1399.
- [34] 李燕丽,金凤鸣,魏强,等.时频电磁法在冀中坳陷潜山及潜山内幕油气预测中的应用.石油地球物理勘探,2016,51(增刊):137-143.

Research on time-frequency electromagnetic method detection of deep karst thermal reservoir and prediction of favorable area in Dongli Lake of Tianjin

CHENG Zhengpu, LEI Ming*, LI Shu, LIAN Sheng, WEI Qiang

(Center For Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, Baoding Hebei 071000, China)

Abstract: Tianjin is abundant in geothermal resources. As the main geothermal reservoir, Wumishan Formation of Jixian System is a typical carbonate reservoir. In order to find out the stratigraphic structure and concealed faults within 5 km of Dongli Lake in Tianjin, focus on the spatial distribution and structural characteristics of the main deep thermal reservoirs, and predict the favorable geothermal areas, the author first applied the time-frequency electromagnetic method, which is mainly used for deep oil and gas exploration, to the deep geothermal resources exploration of Dongli Lake, through high-standard data acquisition, fine data processing and resistivity inversion. Seismic and borehole data are used to calibrate the horizon and finely depict the stratigraphic structure. Seven concealed faults are inferred, all of which are NNE and NWW tensional normal faults. Cangdong Fault (F1) as the necessary channel of the main thermal fluid in the area, conducts heat, stores heat and controls the distribution and shape of geothermal anomaly areas; The thermal reservoir of Wumishan Formation is mainly distributed on the west side of Cangdong fault, the buried depth of the top interface is about -2200 ~ -2400m, and the resistivity profile shows a continuous increasing A-type electrical characteristics. When the karst fissures in the third and fourth sections are relatively developed, the accumulation of hot water in the fissures or faults causes local low resistivity anomalies and H-type electrical characteristics. It indicates the development position of the favorable geothermal area in the target depth, and four favorable geothermal areas are delineated in this paper, which provides important basic data and support for the subsequent development and utilization of geothermal resources.

Key words: time-frequency electromagnetic method; deep karst geothermal reservoir; Wumishan Formation; favorable geothermal area; Dongli Lake in Tianjin