

doi: 10.11720/wtyht.2023.1611

程正璞,连晟,魏强,等.雄安新区深部雾迷山组热储层时频电磁法探测研究[J].物探与化探,2023,47(6):1400–1409. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1611>

Cheng Z P, Lian S, Wei Q, et al. Research on time-frequency electromagnetic method detection of Wumishan Formation thermal reservoir in deep Xiong'an New Area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(6): 1400–1409. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1611>

雄安新区深部雾迷山组热储层时频电磁法探测研究

程正璞^{1,2}, 连晟¹, 魏强¹, 胡文广¹, 雷鸣¹, 李戌¹

(1. 中国地质调查局 水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071000; 2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

摘要:雄安新区是我国中东部地区地热资源开发利用条件最好的地区之一, 蓟县系雾迷山组作为主力热储, 顶界面埋深范围变化大, 是典型的碳酸盐岩型热储层。本文旨在查明雄安新区起步区 6 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。笔者将时频电磁法应用于雄安新区地热资源勘查, 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, 利用拟地震成像技术和钻孔资料进行电阻率层位标定, 精细刻画了地层形态结构。本次工作主要查明隐伏断裂 8 条, 主体为 NNE 走向的正断层, 控制了研究区的隆凹格局和地层分布; 研究区由西向东划分为容城凸起、中间次凹、牛驼镇凸起及霸州县凹陷; 雾迷山组热储层主要分布于牛驼镇凸起、容城凸起及次凹区, 顶界面埋深约 600~2 600 m; 利用本次时频电磁法反演结果, 构建了研究区三维地质模型, 并从热源、通道、储层、盖层、流体等方面分析认为牛驼镇凸起区为最优的地热有利区, 特别是靠近 F₄ 下盘附近区域。

关键词:时频电磁法; 雄安新区; 深部地热; 雾迷山组热储层; 地热有利区

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2023)06-1400-10

0 引言

雄安新区位于华北平原冀中拗陷中部, 水热型地热资源丰富, 也是我国中东部地区地热资源开发利用条件最好的地区之一, 包括牛驼镇地热田、容城地热田和高阳地热田。

依托多个地热地质调查项目, 专家学者在雄安新区及周边开展了一系列的水文地质调查、地球物理探测、水化学分析、钻井工程和钻孔测温工作, 在区域构造、岩石圈热结构、热源机制、热储特征、储集空间类型、地热资源储量、水源补给等方面形成了一定的认识和成果^[1-11]。

蓟县系热储是雄安新区的主力热储层, 分为雾迷山组和高于庄组, 全区均有分布, 岩性主要为白云岩、燧石条带白云岩、泥质白云岩等, 岩溶裂隙发育、

连通性好。其中雾迷山组是雄安新区目前地热开发的主要地热储层, 其顶面构造埋深为 600~4 000 m, 区内被牛东断层、容城断层和牛南断层分割为雄县断块、容城断块和安新断块 3 个主要的热储断块。蓟县系雾迷山组, 经历了多期构造运动(蓟县、加里东、燕山、喜马拉雅等), 其地层经历过多期隆升剥蚀作用, 雾迷山组残余厚度为 600~1 400 m, 南部残余厚度大, 北部残余厚度薄^[12-17]。

近年来, 在雄安新区开展了一系列地球物理勘探工作, 包括不同比例尺重力、航磁、地面磁测、电法及二维地震工作。李弘等^[18]通过对牛驼镇凸起区的布格重力异常与化极航磁异常进行反演, 获得了牛驼镇凸起区的断裂、潜山构造以及磁性地质体的半定量分布特征; 于长春等^[19]通过对航磁资料的处理, 分析了雄安新区基底构造及岩性特征; 何登发等^[20]利用地震资料对徐水凹陷、容城凸起及牛驼镇

收稿日期: 2022-12-13; 修回日期: 2023-02-14

基金项目: 中国地质调查局项目“干热岩资源调查与勘查试采示范”(DD20230018)

第一作者: 程正璞(1990-), 男, 博士生, 工程师, 研究方向为电磁法数据物理解释、深部地热与油气勘查研究。Email: czp1990@126.com

通讯作者: 连晟(1985-), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 研究方向为电磁法数据物理解释、深部地热与水文地球物理技术研究。Email: 274649602@qq.com

凸起等周边进行精细解释,识别了研究区域的不整合面,并划分了构造—地层层序和断裂系统;商世杰等^[21]利用可控源音频大地电磁法探测了雄安新区附近 1.5 km 以浅的地层结构及隐伏断裂;张龙飞等^[22]通过分析重力资料,得出牛驼镇凸起和容城凸起表现重力高,高阳低凸起则表现为较低缓的重力高,且凸起与凹陷交界处可见明显的重力异常梯度带,代表着断裂构造位置及走向;2020 年中国自然资源航空物探遥感中心利用航空物探综合站(磁、电、放)测量和时间域航空电磁测量数据,得到了白洋淀淀区下第一套砂层三维空间分布特征,划分了全区地下咸淡水分界线,查清了全区航空伽马能谱低背景特征;王凯等^[23]利用深反射地震探测、长周期大地电磁等深部地球物理探测方法对新区内深部地热机制进行了解释,提出了“二元生热”模型,认为放射性元素衰变生热占地表热流的接近 30%,而幔源热流在地表热流中的占比可达约 70%;龙慧等^[24]利用二维地震和高密度电阻率测深揭示了雄安新区 200 m 以浅的三维地质结构特征,并总结了城镇化高干扰环境下地球物理方法的探测深度、横纵向分辨率、目标体响应特征和适用性等;岳航羽等^[25]通过对深反射地震数据的精细处理,提高了深反射地震资料的信噪比、分辨率及保真,有效探测了雄安新区浅中深部地质结构与构造。

地球物理方法各有特点,在一定程度上解决了

某些地质任务,但也存在不足之处。如表 1 所示,大地电磁法(MT)虽探测深度大,但一般测点距较大、抗干扰能力差,浅部勘探盲区大,多用于热源机制的研究;可控源音频大地电磁法(CSAMT)勘探深度 1~2 km,虽能在一定程度上揭示地层结构和断裂构造,但不能探查到更深部热储层的形态,且靠近城镇周边抗干扰能力弱,导致原始资料品质下降,分辨率下降;人工地震勘查虽能较精细查明地下深部地质结构及构造特征,但存在能量不均衡、深层信号弱、干扰波复杂多变等问题,且勘探成本高;航空物探和高密度电磁法施工效率高,但勘探深度有限,一般仅能查明 200 m 以浅的地质结构。

为解决常规电磁法抗干扰能力差、浅部勘探盲区大、勘探深度不足、分辨率不足及人工地震深部反射信号弱、潜山内幕反射杂乱、勘探成本较高的问题,本文利用中石油东方地球物理勘探有限责任公司研发的 TFEM-T3 型大功率(200 kW)恒流时频电磁仪和 WL2C-B 型组网式采集站在雄安新区开展时频电磁法地热勘查工作,在前人研究基础上,查明研究区隆凹构造和 6 km 以浅的地层分布特征,重点查明雾迷山组、高于庄组深部热储层空间分布及形态结构特征,探明隐伏断裂及其次级断裂的位置、走向、规模及性质,建立研究区三维地质模型,圈定地热有利区,为深部地热资源评价、钻探提供地质依据。

表 1 多种地球物理勘探方法对比

Table 1 List of comparison of various geophysical exploration methods

方法	探测深度/km	分辨率	抗干扰能力	施工效率	施工成本	适用范围
AMT	2	中	弱	高	低	中浅水热
MT	30	低	弱	低	中	深部热源机制
CSAMT	2	高	中	高	低	中浅水热
TFEM	10	高	强	高	中	中深水热或干热
人工地震	5	高	强	高	高	中深水热或干热

备注:横向分辨率为点距的二分之一;深度不同,纵向分辨率不同。

1 研究区地质概况

雄安新区位于渤海湾盆地冀中拗陷的中部^[26],构造单元上包括牛驼镇凸起南部、牛北斜坡南部、容城凸起、高阳低凸起北部、霸县凹陷、保定凹陷和白洋淀洼陷;其西北部为徐水凹陷,东南部为文安斜坡,北部为廊固凹陷,南部为饶阳凹陷(图 1)。

冀中拗陷在中生代燕山运动挤压和新生代太平洋板块俯冲弧后拉张伸展的构造作用下形成的一系列正断层,研究区内规模较大、对区域构造起控制作用的隐伏基岩断裂主要为保定—石家庄断裂、容西

断裂、容城断裂、牛东断裂和徐水断裂^[27-29]。新生代断裂活动主要集中在古近系沙河街组四段(Es⁴)和新近系馆陶组(N₂g)、明化镇组(N₂m)沉积时期,地表未见构造活动迹象。

研究区位于雄安新区的起步区内,其沉积地层序列由下而上依次为太古宇变质岩、元古宇青白口系(Qb)、蓟县系(Jx)和长城系(Ch)、新生界古近系(E)、新近系(N)和第四系(Q)地层,而古生界和中生界地层缺失^[30-32]。

通过对前人研究资料的收集与分析^[18-19],结合研究区内电测井资料,整理得到区内各地层岩性、电阻率、平均密度、平均磁化率(表 2),由表 2 可知,研

表 2 研究区地层物性统计

Table 2 Statistics of physical properties of strata in the study area

年代 地层		岩性	电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)		平均密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	平均磁化率/ 10^{-5}SI	属性
			范围	平均			
新生界	Q	砾石、粗砂、中砂、细砂、 粉砂、粉土、黏土	11~29	17.5	2.00	80	盖层
	N	砂岩、粉砂岩	3~17	8	2.10	50	热储
	E	红土、黏土、砂岩、泥岩	2~13	5	2.24	32	
元古宇	Qb	灰岩					盖层
	Jx	白云岩、玄武岩、页岩	50~5000	>1000	2.72	3.8	热储
	Ch						
太古宇		角闪岩、片麻岩	50~10000		2.61	2000	基底

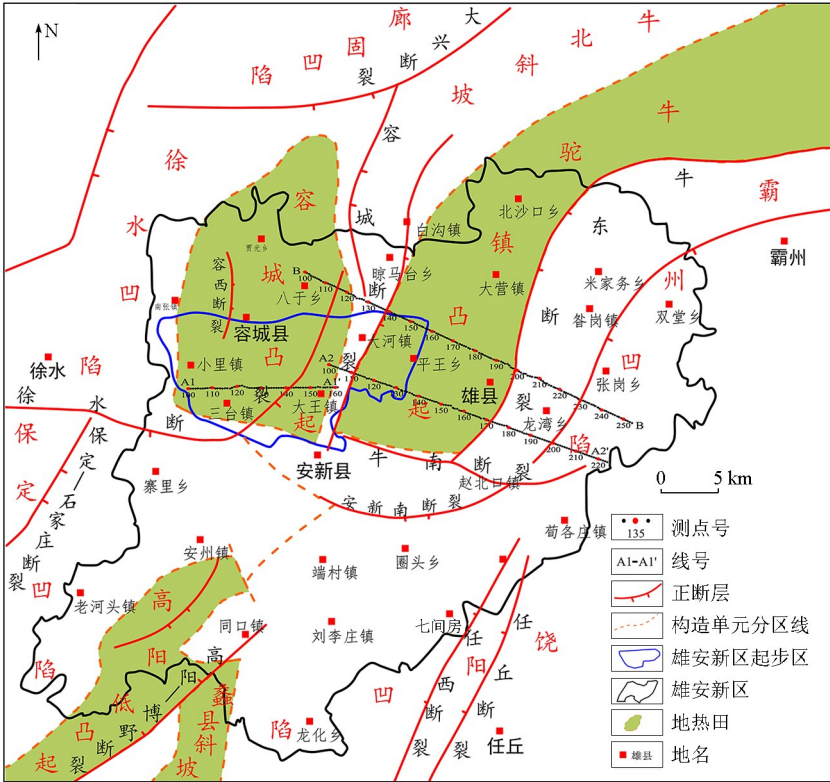


图 1 雄安新区前中生界顶面主要构造分布(据文献[13]修编)

Fig. 1 Main structural distribution on the top surface of the pre Mesozoic in Xiong'an New Area(revised by reference[13])

究区地层电阻率总体上随地层时代由新到老表现为:新生界第四系次高阻层、新生界新近系低阻层、元古界次高阻层、太古界高阻层,为电磁法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,实现了时间域电磁法和频率域电磁法的统一。[33-35]。

图 2 是 TFEM 勘探野外施工示意,施工时由发射和接收两个部分组成。图中 A、B 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)恒流时频电磁仪向地下供电;接收端多台 WL2C-B 型组网式采集站[36]排列接收,布设在离发射源 5~15 km 的地方,通过接地电极 M、N 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,探测深度与激发的最大周期有关,激发周期越长探测深度越大。

研究区临近雄县县城,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[37],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

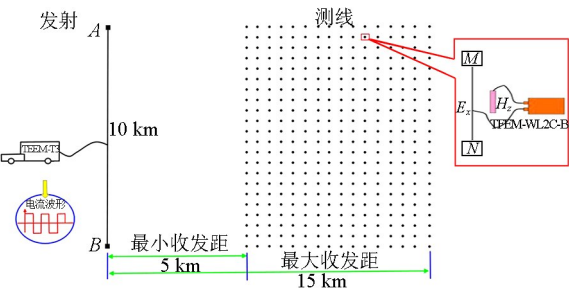


图2 时频电磁法野外施工示意

Fig. 2 Schematic of TFEM exploration field construction

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雄安新区布设了3条时频电磁法剖面, 总长度 67.4 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, 重点如下:

1) 开工前, 对所有参与施工的接收仪器和测量仪器进行一致性试验, 均方误差均小于 2%; 对发射设备开展内噪声测试 ($< 0.5 \mu\text{V}$)、谐波测试 ($< 0.007\%$)、正弦波测试 (波形完好), 确保设备性能正常;

2) 提前踏勘了解区内干扰源位置及类型, 利用高清卫星软件对测点进行展绘, 尽量避开干扰源, 选择地势平坦开阔位置放样; 测点要均匀分布, 不得出现突拐现象, 做好测量标识且严禁挪动;

3) 根据室内模拟结果及开工前收发距试验结果, 确定本研究区收发距范围为 7~11 km; 选择构造简单且较潮湿的地点作为 A、B 供电电极, 确保接地电阻不大于 15 Ω , 实发电流不小于 80 A;

4) E_x 方向为测线方向, MN 距和方位采用 RTK 实测, 两极的定位误差小于 1%, 方位误差小于 1°;

5) 接收端采用不极化电极, 定期进行配对, 确保电极差小于 2 mV; 实测时, 电极要与泥浆接触良好, 确保接地电阻不大于 2 000 Ω 、自然电位不大于 20 mV, 埋设且静置 20 min 后, 方可采集数据;

6) 当日及时处理、评价, 对异常点或不合格点要结合测点周围环境进行复核并制定质量改进措施, 及时返工。

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^[38-39](图 3), 结合勘查目标, 主要包括数据预处理、求取电性参数、电阻率约束反演、层位标定、综合地质解释等方面。

1) 数据预处理: 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;

2) 求取电性参数: 在数据库的基础上, 利用激发电流文件对数据进行归一化处理, 去除干扰频点和畸变点, 求取各点振幅和相位数据;

3) 利用研究区已知物性、电测井等资料进行电阻率约束反演, 并对电阻率反演剖面进行地层标定, 建立电性异常层与地质层位之间的对应关系;

4) 结合以往的地质、钻井和其他地球物理资料进行综合地质解释, 分析研究区 6 km 以浅的热储层空间分布、断裂特征; 并结合地热构造演化和盖层厚度等, 预测地热有利区。

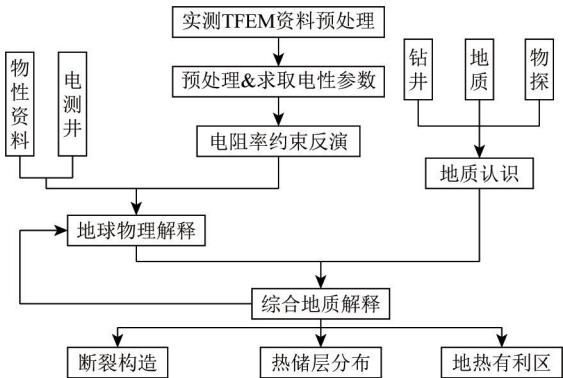


图3 时频电磁数据综合处理解释流程

Fig. 3 Flow chart of comprehensive processing and interpretation of time-frequency electromagnetic data

4 综合解释

4.1 典型单线地层划分

利用研究区已知物性、电测井等资料进行电阻率约束反演后, 得到电阻率反演剖面, 如图 4a 所示, 元古界及太古界地层整体显示为高阻特征, 电性差异较小, 分层信息不明显, 针对此特点, 文中采用电阻率数据拟地震成像技术增强层间电性差异信息, 结合区内钻井资料, 对太古宇与元古宇之间、元古宇内部层位进行精细划分 (图 4b)。

拟地震成像是综合研究区内密度、速度和电阻率等岩石地球物理属性的基础上, 对速度和密度

进行相互转换,转换后的属性一定程度上包含了岩石内部固有地层界面或岩性岩相、断层等物理体的差异特征,将这些差异性以类似地震波同相轴的形式表示出来。

由图 4b、4c 可见,第四系(Q)地层在电阻率剖面上显示为表层连续次高层层,在拟地震剖面上显示为强振幅特征,整条剖面均有分布,厚度相对平稳,厚度 200~300 m。

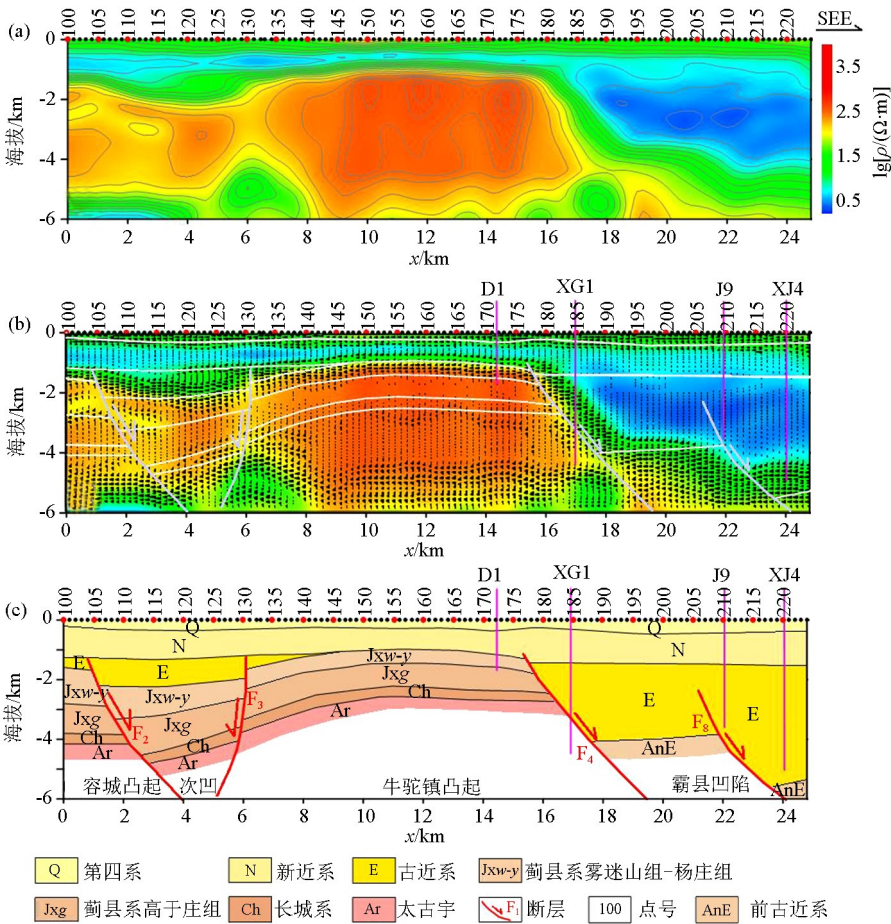


图 4 A2-A2'测线电阻率反演剖面(a)、拟地震成像(b)、地质解释剖面(c)

Fig. 4 Resistivity inversion profile(a), pseudo-seismic imaging map(b) and geological interpretation profile(c) of A2-A2' survey line

新近系(N)地层在电阻率剖面上显示为浅层连续低阻层,在拟地震剖面上显示为弱振幅特征,整条剖面均有分布,F₄断层上盘方向厚度有所增大,厚度范围 700~1 200 m。

古近系(E)地层在电阻率剖面上显示为低阻层,剖面西段(1~6 km)地层分布相对局限,在拟地震剖面上显示较强振幅特征,具有一定的层状特征,F₂与 F₃断层之间厚度较大,约 1 000 m,F₂断层下盘方向厚度约为 300 m,F₃断层下盘方向厚度由西向东减薄,厚度范围 0~400 m之间;剖面东段(16~25 km)在拟地震剖面上显示为连续的弱振幅特征,与上覆新近系(N)地层由空白振幅区相隔;F₄断层上盘方向古近系厚度急剧增大,185~210号测点范围厚度约为 2 500 m,F₈断层以东厚度再次增加,最大可达约 4 000 m。

蓟县系雾迷山组—杨庄组(Jxw-y)地层电阻率显示为低阻向高阻过渡的特征,由浅到深电阻率逐渐升高,拟地震显示为强振幅特征,底界处振幅减弱或消失。容城凸起区地层顶界面埋深约 1 600 m,厚度约 1 200 m;中间次凹区地层顶界面埋深约 2 000~2 200 m,厚度由西向东逐渐减薄,范围约 600~1 100 m;牛驼镇凸起区地层顶界面埋深约 900~1 600 m,厚度相对平稳,约 500~600 m。

蓟县系高于庄组(Jxg)地层整体显示为高阻层,由连续分布的高阻异常团块组合而成,拟地震剖面中 0~8 km 范围显示为弱振幅特征,8~16 km 范围内振幅极弱,为空白反射区。

容城凸起区地层顶界面埋深约 2 800 m,厚度约 1 000 m;中间次凹区地层顶界面西深东浅,约 3 300~2 600 m,厚度西厚东薄,约 1 000~1 200 m;牛驼

镇凸起区地层顶界面埋深两侧深中间薄,约 2 200~1 400 m,厚度相对平稳,约 800~1 000 m。长城系(Ch)地层电阻率显示为高于庄组高电阻率向下逐渐降低的过渡带特征,拟地震资料显示为弱—中等振幅特征;因其与太古界上部次高阻特征较难区分,由区内高深 1 井预测本套地层厚度约为 400 m,其顶界面埋深规律与高于庄组一致。

太古界地层(Ar)整体显示为高阻异常特征,尤其是剖面中段 8~16 km 范围,高阻相对稳定,拟地震资料显示为稳定的弱振幅异常带,深部低阻发育推测与太古界内部岩性变化及局部断裂作用相关,也可能与深部地幔物质上涌有关,推测对深部热源具有一定的导通作用。

4.2 断层展布特征

本文搜集了研究区及周边 1:5 万重力资料,采用归一化标准偏差法(NSTD)提取与断裂构造相关的异常信息,等值线极大值处推断为断裂位置^[40],结合 3 条时频电磁法剖面电阻率反演结果,共解释

8 条断层,主体为 NNE 走向的正断层,控制了研究区隆凹格局和地层分布(图 5)。其中 F₁ 为徐水—安新一文安转换断层的西段,倾向由 S 向转为 SW 向的 I 级断层,具有正断兼左行走滑性质,是区域上冀中拗陷北段与中段的分界;F₁ 断层以北,由西向东分别为近 SN 向容城凸起、近 NNE 向中间次凹(亦称牛北斜坡)、近 NNE 向牛驼镇凸起及霸县凹陷;F₁ 断层以南为保定凹陷范围。F₂ 为容城东断裂,控制了容城凸起的东部边界和中间次凹(又称牛北斜坡)的西侧边界,是走向近 NNE 向、倾向 SEE 的 II 级正断层;F₃ 为牛驼镇凸起西部边界断层,同时控制了中间次凹的东侧边界,是走向近 NNE 向、倾向 SEE 的 II 级正断层;F₄ 为牛东断裂,控制了牛驼镇凸起东部边界,其上盘方向为霸县凹陷,是走向近 NNE 向、倾向 SEE 的 II 级正断裂;F₂、F₃、F₄ 断层均穿过 A2-A2' 与 B-B' 两条测线,南端交于断裂 F₁;F₅、F₆、F₇ 为容城凸起内部断裂,F₈ 为霸县凹陷内部断裂,走向均近 NNE 向。

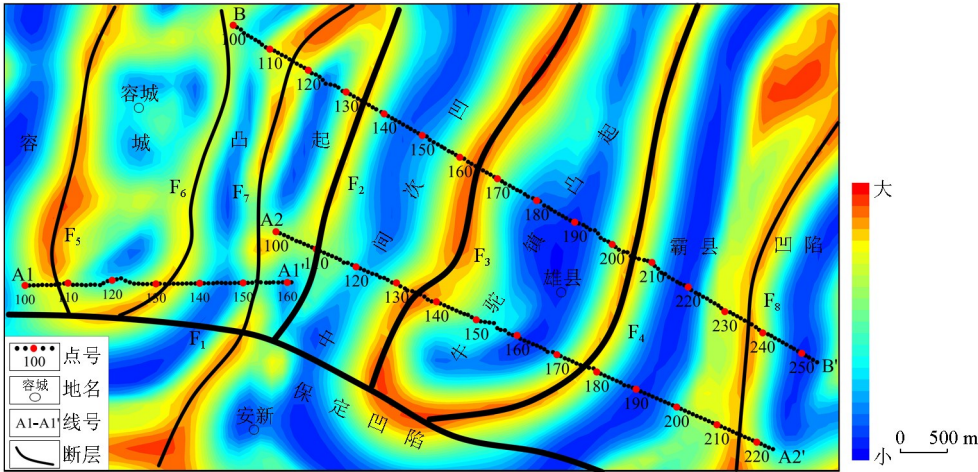


图 5 研究区断裂与重力归一化标准偏差叠合

Fig. 5 Overlapping map of faults and gravity normalized standard deviation in the study area

4.3 蓟县系雾迷山组热储层顶界面构造特征

由于研究区整体为新生界覆盖层,因此本文的重点研究目标地层为元古界蓟县系雾迷山组,也是目前雄安新区开发利用的主力热储层位。

利用已知钻孔资料,结合 3 条时频电磁电阻率反演剖面,本文推断并绘制了研究区蓟县系雾迷山组顶界面构造,如图 6 所示,断裂 F₂ 以西为容城凸起,以 F₇、F₆ 为边界,分为 3 个构造条带。其中断层 F₂、F₇ 之间顶界面埋深北浅南深,范围约 1 000~1 800 m,北部发育有 2 处构造高点,一处位于 B-B' 的 125~129 号点南侧,另一处位于 113~126 号点北侧;断层 F₆、F₇ 之间顶界面埋深北浅南深,范围约 1 400~2 600 m,南部发育有 1 处构造低点,位于 A1-

A1' 东段 140~153 号点,推测为局部次一级凹陷;断层 F₆ 以西顶界面埋深西深东浅,范围约 1 000~1 700 m,在 F₅、F₆ 之间发育有 1 处构造高点,位于 A1-A1' 的 122~127 号点的北侧。

中间次凹发育在断层 F₂~F₃ 之间,为次一级的箕状断陷,雾迷山组顶界面埋深西深东浅,顶界面埋深范围约 1 400~2 400 m,发育一近 NNE 向的构造低条带,穿越 B-B' 线 141~145 号点和 A1-A1' 线 110~112 号点。

牛驼镇凸起区发育在断层 F₃~F₄ 之间,基底顶面构造整体 NNE 向,雾迷山组顶界面埋深北浅南深,范围约 600~1 400 m,整体发育南、北两处构造高点,分别位于 A2-A2' 测线的 146~172 号点与 B-B'

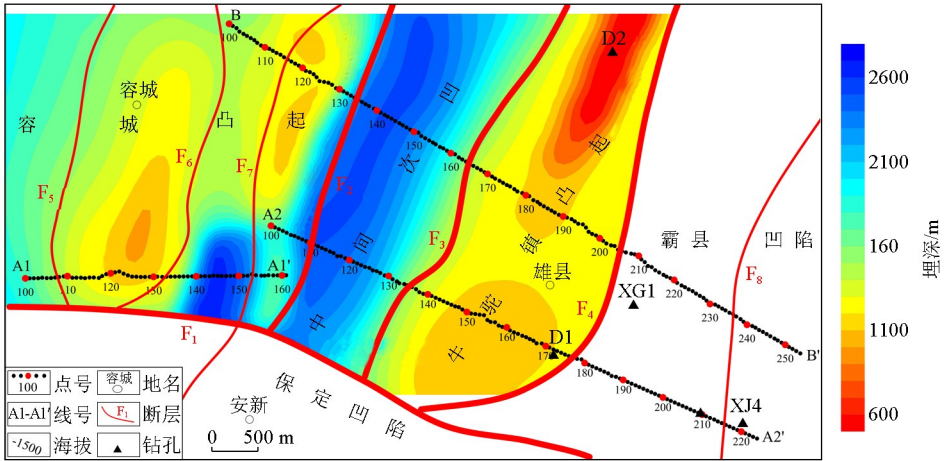


图 6 蓟县系雾迷山组顶界面构造

Fig. 6 Structural of top boundary of Wumishan Formation of Jixian System

测线的 178~190 号点处, 钻孔 D2 揭示顶界面埋深最浅约 600 m; 断层 F_4 以东霸县凹陷区域古近系地层厚度大, 未揭示雾迷山组顶界面。

综上, 研究区蓟县系雾迷山组顶界面埋深范围约 600~2 600 m, 牛驼镇凸起区顶界面埋深最浅。

4.4 预测地热有利区

雄安新区属于中低温地热系统, 热源、通道、储

层、盖层、流体等是中低温对流型地热资源聚集的要素^[41], 本文通过对研究区地层结构、断裂构造的分析, 构建了研究区三维地质模型(图 7), 直观反映了研究区内隆凹格局和断层发育情况; 同时结合前人研究成果, 从热源、通道、储层、盖层、流体等方面分析预测了研究区地热有利区。

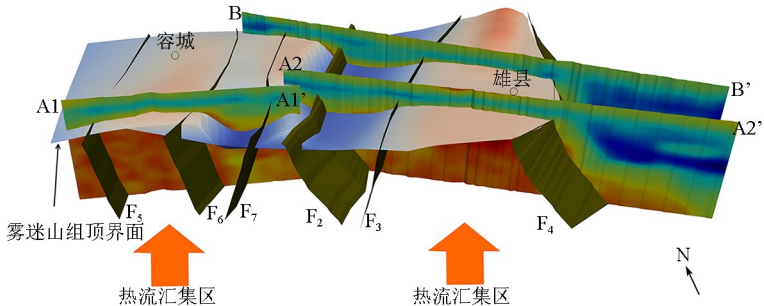


图 7 研究区三维地质模型

Fig. 7 3D geological model of the study area

王凯等^[23]利用深反射地震和长周期大地电磁探测资料构建了雄安新区深部“二元”生热模型, 认为放射性元素衰变生热占地表热流的接近 30%, 而幔源热流在地表热流中的占比可达约 70%; 同时认为牛驼镇地热田和容城地热田存在深部热源, 以区域断裂为热通道, 大地热流由深部向上传导、扩散到牛驼镇凸起和容城凸起顶部(图 7), 对碳酸盐岩储水层进行加热, 形成地热储层; 上覆新近系沉积地层是良好的热盖层。

运移通道是指连接水源和储层的通道, 其中张性正断裂是地热资源运移重要的通道条件。雄安新区内的地热田都处于多条断裂交汇部位(图 6), 这些断裂与地热田的形成有不同程度的联系。牛东断裂(F_4)处于牛驼镇凸起与霸县凹陷两个构造单元之间, 是一条延伸长、落差大、活动强的高角度张性

正断层; 在牛东断层下盘发育了底辟构造, 可能是由深部地幔物质上涌引起浅层抬升所致^[41], 另外在断裂附近有新近系的玄武岩呈串珠状展布^[18], 说明牛东断裂(F_4)既是研究区的导热断裂, 也是导水断裂。容城东断裂(F_2)位于容城凸起东侧, 走向近 NNE 向, 剖面上表现为典型的犁式正断裂的特征, 该断裂控制了容城凸起内新近纪地层的发育, 并且容城东断裂断面发育了大量的裂缝带、溶蚀带, 说明该断裂是牛驼镇凸起基岩热水的上涌出口^[41]。

雾迷山组热储层是目前雄安新区开发利用的主力层位, 是典型的碳酸盐岩型热储, 主要分布在研究区牛驼镇凸起、容城凸起及中间次凹, 岩性为灰白色、灰褐色泥质白云岩。新生界盖层直接覆盖于蓟县系雾迷山组白云岩之上, 雾迷山组储层埋深浅、厚度大, 顶深多分布在 700~2 400 m, 由于经历长期的

淋滤作用,具有高孔高渗的特点。牛驼镇凸起和容城凸起热储层顶面温度为 40~90℃,地表热流量为 70~106.5 mW/m²,为高异常区^[41];中间次凹热储埋深大,在 1 900~2 300 m,地表热流分布在 48.9~66.6 mW/m²,因此要想达到相同的地温,凹陷区的深度要远大于凸起区,说明凸起区具有良好的地热地质条件、更易聚集高温的地下水。

由上述内容可知,牛驼镇凸起和容城凸起都具有良好的地热前景,牛驼镇凸起区雾迷山组顶界面埋深较容城凸起区浅,厚度也较为稳定,且牛东断裂(F₄)作为导热导水断裂,更有利于深部热流向浅部汇集。因此本文认为牛驼镇凸起区为最优的地热有利区,特别是靠近 F₄ 下盘附近。

5 结论

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

1)研究区元古界雾迷山组、高于庄组、太古界地层均显示为高电阻率,地层之间电性差异较小,笔者采用拟地震成像处理手段增强了界面差异信息,并结合钻井资料,对地层层位进行标定,有效提高了解释结果的可靠性。

2)结合重力资料,本文解释了 8 条隐伏断层,主体为 NNE 走向的正断层,控制了研究区隆凹格局和地层分布,由西向东依次发育了容城凸起、牛驼镇凸起和霸县凹陷 3 个主体构造单元,容城凸起与牛驼镇凸起之间发育中间次凹;牛驼镇凸起整体方向以 NNE 向为主,分为南、北两处构造高点;容城凸起分为 3 个构造条带,东、西部规模较大,为凸起区;中间规模小,为次一级的局部凹陷。

3)基本查明了研究区地层分布情况。第四系和新近系地层全区发育,厚度相对稳定;古近系地层主要分布于中间次凹和霸县凹陷内;蓟县系地层在容城凸起、中间次凹、牛驼镇凸起区均有分布,顶界面埋深范围约 600~2 600 m。

4)构建研究区三维地质模型,直观反映了研究区内隆凹格局和断层发育情况;从热源、通道、储层、盖层、流体等方面分析认为牛驼镇凸起区为最优的地热有利区,特别是靠近 F₄ 下盘附近。

参考文献 (References):

[1] 常健,邱楠生,赵贤正,等. 渤海湾盆地冀中坳陷现今地热特征[J]. 地球物理学报,2016,59(3):1003-1016.

Chang J, Qiu N S, Zhao X Z, et al. Present-day geothermal regime of the Jizhong depression in Bohai Bay basin, East China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(3): 1003-1016.

[2] 邱楠生,许威,左银辉,等. 渤海湾盆地中—新生代岩石圈热结构与热—流变学演化[J]. 地学前缘, 2017, 24(3): 13-26.

Qiu N S, Xu W, Zuo Y H, et al. Evolution of Meso Cenozoic thermal structure and thermal rheological structure of the lithosphere in the Bohai Bay Basin, eastern North China Craton[J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(3): 13-26.

[3] 庞忠和,孔彦龙,庞菊梅,等. 雄安新区地热资源与开发利用研究[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(11): 1224-1230.

Pang Z H, Kong Y L, Pang J M, et al. Geothermal resources and development in Xiong'an New Area[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(11): 1224-1230.

[4] 柳娟. 冀中坳陷雾迷山组储层特征及综合评价[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.

Liu J. Reservoir characteristics and comprehensive evaluation of Wumishan Formation in Jizhong depression[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2018.

[5] 鲁锴,鲍志东,季汉成,等. 雄安新区蓟县系雾迷山组岩溶热储特征,主控因素及有利区预测[J]. 古地理学报, 2019, 21(6): 885-900.

Lu K, Bao Z D, Ji H C, et al. Characteristics main controlling factors and favorable area a prediction of karstic geothermal reservoirs of the Jixianian Wumishan Formation in Xiong'an New Area[J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21(6): 885-900.

[6] 刘明亮,何瞳,吴启帆,等. 雄安新区地热化学特征及其指示意义[J]. 地球科学, 2020, 45(6): 2221-2231.

Liu M L, He T, Wu Q F, et al. Hydrogeochemistry of Geothermal Waters from Xiong'an New Area and its indicating significance[J]. Earth Science, 2020, 45(6): 2221-2231.

[7] 戴明刚,马鹏鹏,雷海子,等. 雄安新区雾迷山组岩溶热储特征与有利区[J]. 地质科学, 2020, 55(2): 487-505.

Dai M G, Ma P P, Lei H Z, et al. Distribution characteristics and favorable targets of karst geothermal reservoir of Wumishan Formation in Xiong'an New Area[J]. Chinese Journal of Geology, 2020, 55(2): 487-505.

[8] 胡秋韵,高俊,马峰,等. 雄安新区容城凸起区地热可采资源量动态预测[J]. 地质学报, 2020, 94(7): 2013-2025.

Hu Q Y, Gao J, Ma F, et al. Dynamic prediction of geothermal recoverable resources in the Rongcheng uplift area of the Xiong'an New Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 2013-2025.

[9] 马峰,王贵玲,张薇,等. 雄安新区容城地热田热储空间结构及资源潜力[J]. 地质学报, 2020, 94(7): 1981-1990.

Ma F, Wang G L, Zhang W, et al. Structure of geothermal reservoirs and resource potential in the Rongcheng geothermal field in Xiong'an New Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 1981-1990.

[10] 王贵玲,高俊,张保健,等. 雄安新区高阳低凸起区雾迷山组热储特征与高产能地热井参数研究[J]. 地质学报, 2020, 94(7): 1970-1980.

Wang G L, Gao J, Zhang B J, et al. Study on the thermal storage characteristics of the Wumishan Formation and huge capacity geothermal well parameters in the Gaoyang low uplift area of Xiong'an New Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 1970-1980.

- [11] 赵佳怡,张薇,马峰,等.雄安新区容城地热田地热流体化学特征[J].地质学报,2020,94(7):1991-2001.
Zhao J Y,Zhang W,Ma F,et al. Geochemical characteristics of the geothermal fluid in the Rongcheng geothermal field,Xiong'an New Area[J]. Acta Geologica Sinica,2020,94(7):1991-2001.
- [12] 吴爱民,马峰,王贵玲,等.雄安新区深部岩溶热储探测与高产能地热井参数研究[J].地球学报,2018,39(5):523-532.
Wu A M,Ma F,Wang G L,et al. A study of deep-seated karst geothermal reservoir exploration and huge capacity geothermal well parameters in Xiong'an New Area[J]. Acta Geoscientica Sinica,2018,39(5):523-532.
- [13] 戴明刚,汪新伟,刘金侠,等.雄安新区起步区及周边地热资源特征与影响因素[J].地质科学,2019,54(1):176-191.
Dai M G,Wang X W,Liu J X,et al. Characteristics and influence factors of geothermal resources in the starting and adjacent zone of Xiong'an New Area[J]. Chinese Journal of Geology,2019,54(1):176-191.
- [14] 雷海飞,李红岩,戴明刚,等.雄安新区地温场特征及其控制因素[J].中国煤炭地质,2020,32(2):46-50.
Lei H F,Li H Y,Dai M G,et al. Geothermal field features and their control factors in Xiong'an New Area[J]. Coal Geology of China,2020,32(2):46-50.
- [15] 陈墨香,汪集旻,汪缉安,等.华北断陷盆地热场特征及其形成机制[J].地质学报,1990,64(1):80-91.
Chen M X,Wang J Y,Wang J A,et al. The characteristics of the geothermal field and its formation mechanism in the north china down-faulted basin[J]. Acta Geological Sinica,1990,64(1):80-91.
- [16] 李卫卫,饶松,唐晓音,等.河北雄县地热田钻井地温测量及地温场特征[J].地质科学,2014,49(3):850-863.
Li W W,Rao S,Tang X Y,et al. Borehole temperature logging and temperature field in the Xiongxin geothermal field,Hebei Province[J]. Chinese Journal of Geology,2014,49(3):850-863.
- [17] 胡斌,赵亮,雷海飞,等.雄安新区雾迷山组地热储层分布特征[J].地球科学前沿,2021,11(5):584-589.
Hu B,Zhao L,Lei H F,et al. Distribution characteristics of geothermal reservoirs in Wumishan Formation,Xiong'an New Area[J]. Advances in Geosciences,2021,11(5):584-589.
- [18] 李弘,俞建宝,吕慧,等.雄县地热田重磁响应及控热构造特征研究[J].物探与化探,2017,41(2):242-248.
Li H,Yu J B,Lyu H,et al. Gravity and aeromagnetic responses and heat-controlling structures of Xiongxin geothermal area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2017,41(2):242-248.
- [19] 于长春,乔日新,张迪硕.雄安新区航磁推断的三维基底构造特征[J].物探与化探,2017,41(3):385-391.
Yu C C,Qiao R X,Zhang D S. The basement tectonic characteristics from interpretation of aeromagnetic data in Xiong'an region[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2017,41(3):385-391.
- [20] 何登发,单帅强,张煜颖,等.雄安新区的三维地质结构:来自反射地震资料的约束[J].中国科学:地球科学,2018,48(9):1207-1222.
He D F,Shan S Q,Zhang Y Y,et al. 3-D geologic architecture of Xiong'an New Area: Constraints from seismic reflection data[J]. Scientia Sinica:Terrae,2018,48(9):1207-1222.
- [21] 商世杰,丰成君,谭成轩,等.雄安新区附近主要隐伏断裂第四纪活动性研究[J].地球学报,2019,40(6):836-846.
Shang S J,Feng C J,Tan C X,et al. Quaternary activity study of major buried faults near Xiong'an New Area[J]. Acta Geoscientica Sinica,2019,40(6):836-846.
- [22] 张龙飞,赵石峰,张昭.雄安新区地球物理特征及方法讨论[J].中国科技信息,2020(21):68-69.
Zhang L F,Zhao S F,Zhang Z. Discussion on geophysical characteristics and methods in Xiong'an New Area[J]. China Science and Technology Information,2020(21):68-69.
- [23] 王凯,张杰,白大为,等.雄安新区地热地质模型探究:来自地球物理的证据[J].中国地质,2021,48(5):1453-1468.
Wang K,Zhang J,Bai D W,et al. Geothermal-geological model of Xiong'an New Area: Evidence from geophysics[J]. Geology in China,2021,48(5):1453-1468.
- [24] 龙慧,谢兴隆,李凤哲,等.二维地震和高密度电阻率测深揭示雄安新区浅部三维地质结构特征[J].物探与化探,2022,46(4):808-815.
Long H,Xie X L,Li F Z,et al. 2D seismic and high-density resistivity sounding reveal the shallow three-dimensional geological structure characteristics of Xiong'an New Area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2022,46(4):808-815.
- [25] 岳航羽,王凯,张杰,等.雄安新区及周边深反射地震高精度成像技术[J].石油地球物理勘探,2022,57(4):855-869,793-740.
Yue H Y,Wang K,Zhang J,et al. High-precision imaging technology of deep reflection seismic in Xiong'an New Area and its surroundings areas[J]. Oil Geophysical Prospecting,2022,57(4):855-869,793-740.
- [26] 王朱亭,张超,姜光政,等.雄安新区现今地温场特征及成因机制[J].地球物理学报,2019,62(11):4313-4322.
Wang Z T,Zhang C,Jiang G Z,et al. Present-day geothermal field of Xiong'an New Area and its heat source mechanism[J]. Chinese Journal of Geophysics,2019,62(11):4313-4322.
- [27] 徐杰,高战武,宋长青,等.太行山山前断裂带的构造特征[J].地震地质,2000,22(2):111-122.
Xu J,Gao Z W,Song C Q,et al. The structural characters of the piedmont fault zone of Taihang mountain[J]. Seismology and Geology,2000,22(2):111-122.
- [28] 杨明慧,刘池阳,杨斌谊,等.冀中拗陷古近纪的伸展构造[J].地质论评,2002,48(1):58-67.
Yang M H,Liu C Y,Yang B Y,et al. Extensional structures of the Paleogene in the central Hebei Basin,China[J]. Geological Review,2002,48(1):58-67.
- [29] 范玉璐,谭成轩,张鹏,等.雄安新区现今地应力环境及其对构造稳定性影响研究[J].地球学报,2020,41(4):481-491.
Fan Y L,Tan C X,Zhang P,et al. A study of current in-situ stress state and its influence on tectonic stability in the Xiong'an New Area[J]. Acta Geoscientica Sinica,2020,41(4):481-491.
- [30] 郝爱兵,吴爱民,马震,等.雄安新区地上地下工程建设适宜性一体化评价[J].地球学报,2018,39(5):513-522.
Hao A B,Wu A M,Ma Z,et al. A study of engineering construction suitability integrated evaluation of surface-underground space in Xiong'an New Area[J]. Acta Geoscientica Sinica,2018,39(5):513-522.

[31] 张竞,马震,吴爱民,等. 基于岩性光谱特征的雄安新区地面古河道识别研究[J]. 地球学报,2018,39(5):542-548.
Zhang J, Ma Z, Wu A M, et al. A study of paleochannels interpretation by the spectrum of Lithology in Xiong'an New Area[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2018, 39(5):542-548.

[32] 马震,夏雨波,王小丹,等. 雄安新区工程地质勘查数据集成与三维地质结构模型构建[J]. 中国地质,2019,46(S2):123-129.
Ma Z, Xia Y B, Wang X D, et al. Integration of engineering geological investigation data and construction of a 3D geological structure model in the Xiong'an New Area[J]. Geology in China, 2019, 46(S2):123-129.

[33] Dong W B, Zhao X M, Liu F, et al. The time frequency electromagnetic method and its application in western China[J]. Applied Geophysics, 2008, 5(2):127-135.

[34] He Z X, Suo X D, Hu Z Z, 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.

[35] 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, 937.
He Z X, Chen Z C, Ren W J, et al. Time-frequency electromagnetic (TFEM) method: Data acquisition system and its application[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2020, 55(5):1131-1138, 937.

[36] 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.
Mu Q Y, Wei Q, Pang H C, et al. System composition and functions of the TFEM network time frequency electromagnetic acquisition system[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2017, 27(1):67-70.

[37] 石卓,张辉,段涛,等. 基于时频电磁法的冀中坳陷油气藏勘探调查[J]. 世界地质,2018,37(2):585-594.
Shi Z, Zhang H, Duan T, et al. Investigation of oil and gas reservoir in Jizhong depression based on time-frequency electromagnetic method[J]. Global Geology, 2018, 37(2):585-594.

[38] 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,2013,56(9):3173-3183.
Zhang C H, Liu X J, He L F, et al. A study of exploration organic rich shales using time-frequency electromagnetic method (TFEM) [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(9):3173-3183.

[39] 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, 1202-1203.
He Z X, Dong W B, Zhao G, et al. Time-frequency electromagnetic (TFEM) technology: Data processing[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2021, 56(6):1391-1399, 1202-1203.

[40] Cooper G R J, Cowan D R. Edge enhancement of potential-field data using normalized statistics [J]. Geophysics, 2008, 73(3):H1-H4.

[41] 郭飒飒,朱传庆,邱楠生,等. 雄安新区深部地热资源形成条件与有利区预测[J]. 地质学报,2020,94(7):2026-2035.
Guo S S, Zhu C Q, Qiu N S, et al. Formation conditions and favorable areas for the deep geothermal resources in Xiong'an New Area [J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7):2026-2035.

Research on time-frequency electromagnetic method detection of Wumishan Formation thermal reservoir in deep Xiong'an New Area

Cheng Zheng-Pu^{1,2}, Lian Sheng¹, Wei Qiang¹, Hu Wen-Guang¹, Lei Ming¹, Li Shu¹

(1. Center for Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, Baoding 071000, China; 2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: Xiong'an New Area is one of the areas with the best conditions for the development and utilization of geothermal resources in sedimentary basins of eastern China. Wumishan Formation of Jixian System is the main thermal reservoir, with buried depth of the top boundary varies greatly, which is typical carbonate type thermal reservoir. In order to find out the stratigraphic structure and concealed faults within 6 km of the starting area of Xiong'an New Area, focus on finding out the spatial distribution and structural characteristics of the main deep thermal reservoirs, and predict the favorable geothermal areas, the time-frequency electromagnetic method is applied to the geothermal resources exploration of Xiong'an New Area. Through high-standard data acquisition, refined data processing and resistivity-constrained inversion, the pseudo-seismic imaging technology and borehole data are used to calibrate the resistivity horizon, which effectively improves the reliability of interpretation results. In this work, 8 concealed faults were identified, mainly NNE strike normal faults, which controlled the salient-depression pattern and stratigraphic distribution of the study area. The study area is divided into Rongcheng salient, middle sub-depression, Niutuozen salient and Baxian depression from west to east. The thermal reservoirs of Wumishan Formation is mainly distributed in Niutuozen salient, Rongcheng salient and middle sub-depression, with buried depth of top interface is about 600~2600m. Using the inversion results of the time-frequency electromagnetic method, the three-dimensional geological model of the study area is constructed, and the Niutuozen salient area is considered to be the optimal geothermal favorable area from the aspects of heat source, channel, reservoir, caprock and fluid, especially near the footwall of F₄.

Key words: time-frequency electromagnetic method; Xiong'an New Area; deep geothermal exploration; thermal reservoir of wumishan formation; favorable geothermal area abstract