

何鹏,董杰,管勇,等.典型海岛地热资源勘查定井方法研究——以青岛市小管岛为例[J].海洋地质前沿,2023,39(8):38-48.

HE Peng, DONG Jie, GUAN Yong, et al. The well determination for geothermal resource exploration in typical islands in Xiaoguan Island, Qingdao[J]. Marine Geology Frontiers, 2023, 39(8): 38-48.

典型海岛地热资源勘查定井方法研究

——以青岛市小管岛为例

何鹏^{1,2,3},董杰^{1,2},管勇^{1,2},王青^{1,2},解永健^{1,2*},刘海松^{1,2,3},尹政^{1,2},付佳妮^{1,2}

(1 自然资源部滨海城市地下空间地质安全重点实验室,青岛 266100; 2 青岛地质工程勘察院(青岛地质勘查开发局),青岛 266071; 3 青岛地矿岩土工程有限公司,青岛 266071)

摘要:海岛地区地质环境条件相对较复杂,地形起伏较大,地貌类型多样,地热地质条件特殊,选用合适的地热资源勘查定井的方法,对地热资源的勘查开发具有重要意义。以典型海岛——青岛市小管岛的地热资源勘查工作为例,综合分析小管岛地热地质条件,对比分析地热资源勘查物探方法的优缺点,有针对性地采用音频大地电磁测深 (AMT) 和高精度电磁频谱法 (MES) 相结合的勘查定井方法进行地热资源勘查。综合 2 种物探方法解释成果,获取研究区热储概念模型,确定地热井位置,成功施工 1 500 m 地热井 1 眼,出水量 121.2 m³/d,孔底温度 39.2 ℃。根据小管岛地热资源勘查实例表明,采用 AMT 法和 MES 法在海岛地区进行地热资源勘查是可行的、有效的。

关键词:典型海岛; 地热资源; 勘查定井方法; AMT 法; MES 法

中图分类号:P736;P314

文献标识码:A

DOI:10.16028/j.1009-2722.2023.135

0 引言

地热资源作为一种绿色低碳、广泛分布、储量丰富、安全优质的可再生能源、矿产资源及旅游资源,在建筑供暖、休闲理疗、工业发电、发展设施农业及旅游业等方面开发优势明显^[1]。地热资源的勘查开发,对于合理利用自然资源,缓解能源紧张状况,促进经济可持续发展意义重大^[2]。

山东省地处一带一路,是国家沿海发展战略的重要组成部分,海岛是中国经济发展中一个很特殊的区域^[3]。山东省有海岛 589 个,地热资源潜力较大,开发利用价值高,地热资源是协调海岛资源承载和环境保护的重要抓手,是发展生态旅游的优势

资源^[4]。小管岛位于青岛市东南部崂山湾,地理位置优越,自然风光优美,生态环境优良(图 1)。在小管岛引入“地热温泉”的概念,可有效促进旅游业高质量发展,带动当地经济。小管岛属于基岩岛,岛上基岩大部分裸露,东西长约 500 m,南北最长 900 m,地形连绵起伏,局部发育冲沟,地貌以剥蚀堆积丘陵为主,同时岛区断裂构造不发育,寻找地热资源难度较大,选择合适的地热资源勘查定井方法对成功施工地热井意义重大。

近年来,电磁法作为主流的物探方法已成功应用于地热勘查工作中^[5]。深部地热资源勘查常用的地热勘查物探方法有:音频大地电磁法(AMT)、可控源音频大地电磁法(CSAMT)、广域电磁测深法(WFEM)、大地电磁测深法(MT)以及微动测深法等。通常选择其中 2 项或者 3 项进行相互验证指导地热定井。这些深部地热物探方法各具特点,通过实践均具有一定的成效。可控源大地音频测深特点明显,主要表现为探测深度大(最深可达 3 000 m)、穿透高阻层能力较强、地形影响小且便于修正,横方向分辨能力高^[6-9];音频大地电磁法具有不受高阻地层屏蔽和有效识别低阻地层的能力,

收稿日期:2023-05-17

资助项目:青岛市城市地质调查项目(ZFCG2019001542);山东省自然资源厅地质勘查项目“青岛市小管岛及周边海域综合地质调查项目”(2020)

作者简介:何鹏(1989—),男,高级工程师,主要从事水文地质、地热地质方面的研究工作。E-mail:573123081@qq.com

* 通讯作者:解永健(1988—),男,工程师,主要从事地质矿产、地质遗迹方面的研究工作。E-mail:Mr_HealthXie@163.com

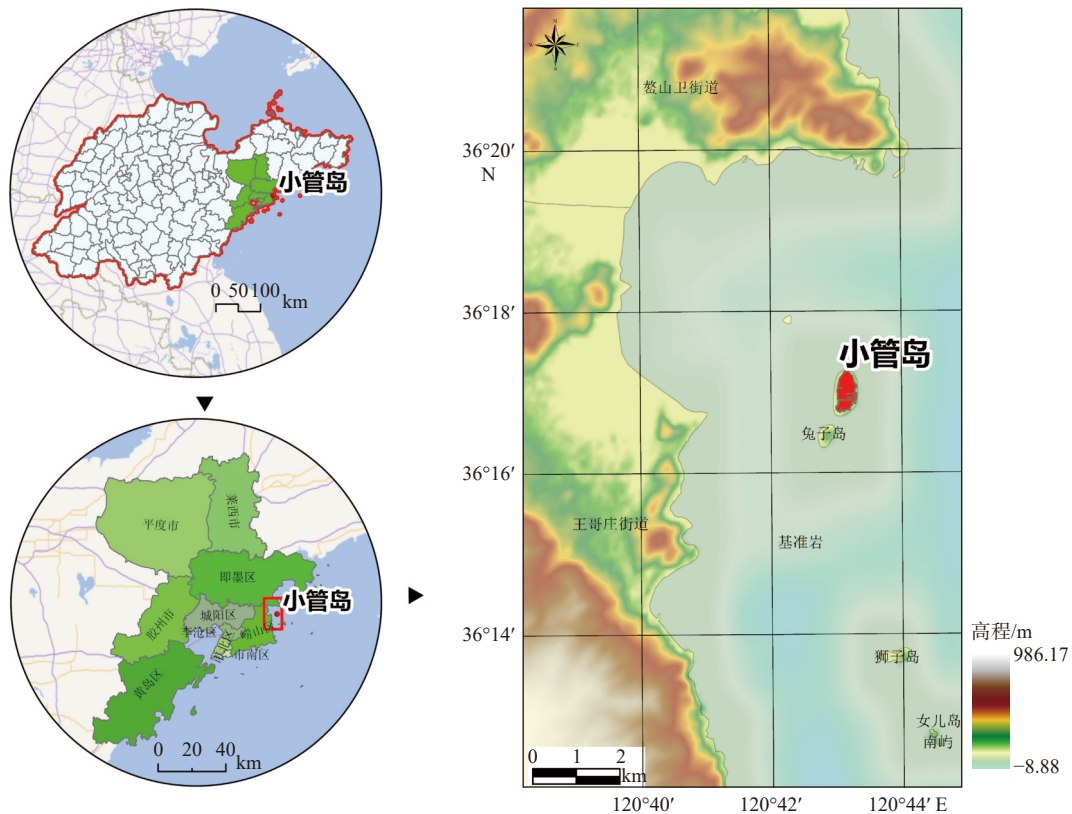


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location of the study area

且得到显著效果^[10-12];大地电磁测深跟 AMT 法相比探测深度更深,探测结果可为地层界面识别及深部地壳、深部断裂、构造单元划分提供重要依据^[13],为热储分布和深部构造研究提供重要信息;广域电磁法具有分辨率高、工作效率高、抗干扰能力强、勘探深度大^[14]、成本低等优势;微动测深法抗干扰能力强,在纵向分辨率上具有明显优势,对识别、划分储热控水构造具有很好的参考意义^[15]。选取何种物探方法可以有效地勘查定井、降低地热勘探的风险和损失、提高地热勘探的成功率,对海岛地热资源勘查具有重要的借鉴意义,同时起到示范引领的作用。

1 地质概况

1.1 区域构造

小管岛及周边海域位于秦岭-大别-苏鲁造山带东部、胶南-威海隆起区中部、胶莱盆地东部、海阳-青岛断陷中部、崂山凹陷和王村凹陷的结合部位。

海岛南部沿海发育一条小断裂,岩石中节理十

分发育,局部见小型褶皱。断裂位于海岛南部沿海,总体走向 NE 向,倾向 NW 向,倾角 85°,局部近直立,上部宽约 0.3 m,往下宽度增大,约 0.7 m。断裂主要由碎裂岩、断层泥等组成,岩石极为破碎,近粉末状。往北延伸约 20 m,向南延伸至海域。断裂两侧均为花岗片麻岩,东侧为一处平卧褶皱,枢纽产状 $110^{\circ} \angle 10^{\circ}$,西侧为正常花岗片麻岩,片麻理产状 $108^{\circ} \angle 65^{\circ}$ 。推测该断裂为压扭型断裂。

1.2 地层

小管岛第四系松散层主要分布于西侧海湾,海岛近代地貌形态决定了其松散沉积物岩性及成因类型。根据其岩性特征、时代及成因类型,划为旭口组,岩性主要为灰黄色粉砂质淤泥、淤泥质粉砂、粉砂、黏土夹薄层中细粒砂,厚度 < 3 m。

1.3 岩浆岩

研究区侵入岩中脉岩较发育(图 2a),已初步圈定煌斑岩脉 8 条,其中 5 条为近 EW 向,3 条为 NE 向。煌斑岩脉宽 0.3~5 m 不等,长 50~150 m,岩脉倾角陡立,倾角多 > 70°。

岩石风化面呈灰色,新鲜面呈深灰绿、黑灰色,

具煌斑结构,块状构造(图 2b、c)。岩石成分由斑晶和基质组成,斑晶主要为角闪石、斜长石,占比 15%~20%;基质主要为角闪石、黑云母、斜长石、碳酸盐矿物、石英和少量不透明矿物。岩石整体发生较强烈蚀变,多数角闪石发生绿泥石化和次闪石化,斜长石被绢云母集合体交代。

1.4 变质岩

小管岛大面积分布新元古代荣成序列宝山单元黑云二长花岗质片麻岩,受区域构造影响,总体呈 NE 向分布,岩体经历了复杂的变质变形作用,次生层状构造发育,其内可见剪切作用形成的小褶皱、平卧褶皱、开阔圆弧褶皱。黑云二长花岗质片麻岩片麻理发育明显,总体走向呈 NE 或近 SN 向,东侧倾向东,倾角 50°~80°,由东向西倾角有变陡趋势;西南侧片麻理倾向变为 NW 向,倾角为 20°~35°;岩石节理裂隙较发育,多与片麻理呈大角度斜交(图 3a)。

岩石具变余花岗结构,弱片麻状构造,组成矿物以钾长石、斜长石、石英、黑云母、角闪石和少量

不透明矿物等为主(图 3b、c),其中钾长石约 40%,斜长石约 25%,石英约 25%,黑云母角闪石等约 10%。岩石整体发生强烈碎裂。

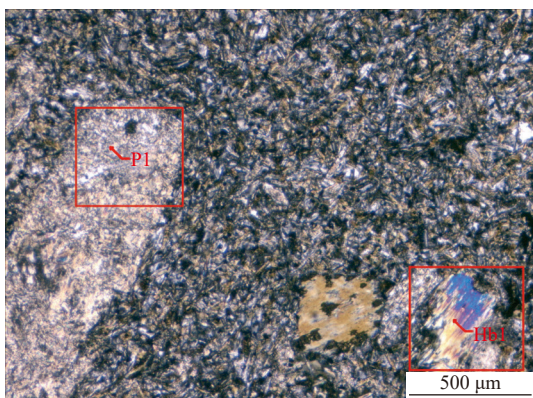
2 资料与方法

2.1 以往资料的收集与分析

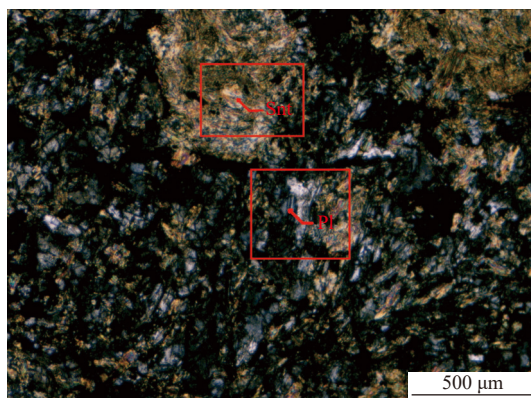
充分收集并分析研究区地质构造和以往水文地质、地热地质的成果资料,确定所处海岛地区地热资源形成的“储、盖、源、通”条件,为地热地质调查工作提供科学依据。研究区地热资源主要受断裂控制,按热传输方式分为传导型地热资源和对流型地热资源。青岛地区热储类型以带脉状裂隙热储为主,热储岩性主要为中生代的花岗质岩石及早寒武纪变质长英质类岩石,地热田受控于区内的深大断裂构造,特别是 NNE、NE 与 NW 向断裂相交呈“V”型且倾向相向区域内,属于深循环对流型地热系统,如即墨东温泉和旧店地热;在沿海地带也分布有以 NE 向断裂或多期岩性接触带为主要构



(a) 花岗片麻岩中的煌斑岩脉照片



(b) 煌斑岩中斜长石、角闪石镜下照片
(40×, P1-斜长石, Hb1-角闪石)



(c) 煌斑岩中斜长石、皂石镜下照片
(40×, P1-斜长石, Snt-皂石)

图 2 煌斑岩脉照片和镜下照片

Fig.2 Photos and microscopic images of lamprophyre veins



(a) 黑云二长花岗质片麻岩野外照片

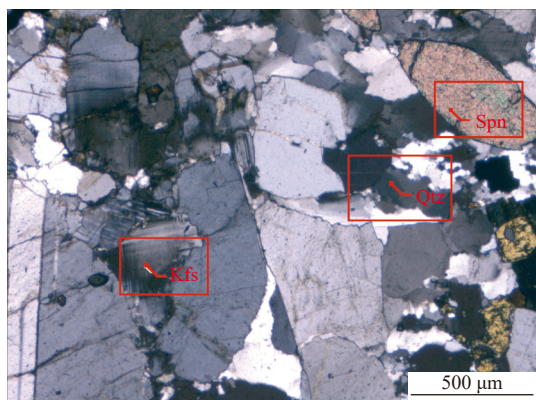
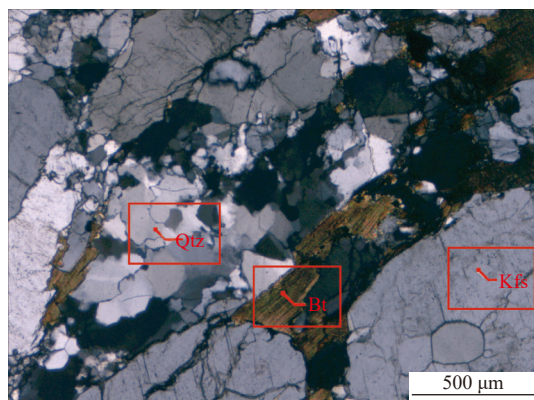
(b) 二长花岗片麻岩中钾长石、石英、榴石镜下照片
(40×, Kfs-钾长石, Qtz-石英, Spn-榴石)(c) 二长花岗片麻岩中石英、黑云母、钾长石镜下照片
(40×, Qtz-石英, Bt-黑云母, Kfs-钾长石)

图 3 二长花岗质片麻岩照片和镜下照片

Fig.3 Photos and microscopic images of monzonitic granitic gneiss

造的地热井, 该类型地热属于传导型地热系统。因此, 地热资源的勘查主要目的在于靶区可能存在的深部含水层。

2.2 勘查定井方法

根据地区地热资源的成矿机理及分布规律, 通过大比例尺地热地质调查, 综合分析研究区已有的地质、构造、地热地质等相关资料, 初步识别海岛地热资源可能存在的有利地段, 结合海岛自然地理条件, 有针对性地选择“音频大地电磁测深+高精度电磁频谱测深”相结合的地球物理勘查方法确定地热井位置, 并施工地热井验证, 进而确定海岛地区较适用的地热资源勘查定井方法。

2.2.1 地热地质调查

开展 1:10 000 地热地质调查工作, 初步查明海岛及周边海域地质构造、地层岩性、地层结构及地温场特征, 进而分析海岛地热形成的条件, 在重点地段开展 1:100 地质剖面测量, 进而圈定可能赋存地热资源的断裂构造或者深部节理裂隙密集带的

分布范围, 即为深部含水层。

2.2.2 地球物理勘查

因海岛地区地形起伏大、场地范围小及四面环海等限制, 常规电法无法使用, 且主动源物探方法也难以布设发射源, 微动测深法受地形起伏无法开展。因此, 优选音频大地电磁测深+高精度电磁频谱 2 种方法进行热储层的探测, 最终确定有利的定井位置。

根据以往数据分析和地热地质调查结果, 为进一步查明深部热储层的分布及富水性特征, 采用音频大地电磁测深进行面上控制热储的分布, 结合高精度电磁频谱测深判定热储层的富水性特征, 具体工作部署见图 4。

(1) 音频大地电磁测深

对初步圈定的热储分布靶区, 采用 AMT 测深法, 针对性地布设 AMT 测深剖面, 准确判定热储层的产状及分布特征。

(2) 高精度电磁频谱测深

在 AMT 测深成果的基础上, 有针对性地布设

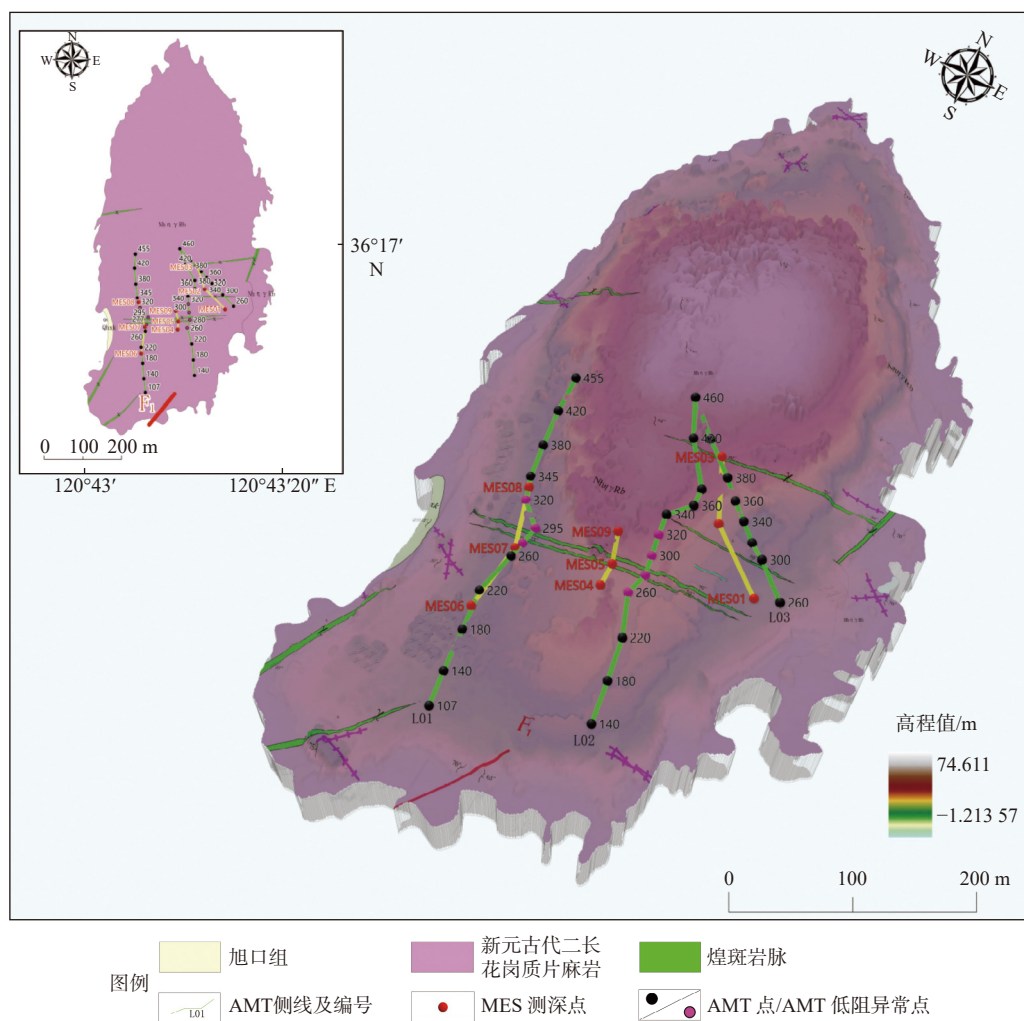


图 4 物探工作部署

Fig.4 Deployment of geophysical prospecting

MES 法测深点, 进行热储层富水性情况的判定。

2.2.3 地热地质钻探

根据以上地热勘查方法确定的地热井位置, 进行地热探采结合井施工, 查明地热资源赋存的地层结构、热储层岩性、温度等特征。地热钻探是地热勘探中最直观、准确、有效的方法, 但由于投资大, 工作量有限, 因此, 在钻井施工前, 应综合分析所有相关资料, 结合物探解释结果, 认真制定地热钻井施工设计方案。在钻井过程中, 应尽可能多地进行各种样品的采集、测试和实验, 以获得最多的地热地质信息^[16]。

2.3 资料综合解释

2.3.1 音频大地电磁测深资料解释

根据 L1 剖面电阻率等值线断面图(图 5), 地

表 260—340 号点, 深度 450 m 以浅, 出现北倾低阻异常, 推断为岩脉附近节理裂隙密集带; 深部 107—320 号点, 深度介于 550~1 250 m, 出现“V”字型低阻异常带, 推断为深部破碎带。

根据 L2 剖面电阻率等值线断面图(图 5), 从地面 140—340 号点, 深度 750 m 以浅, 出现明显北倾的低阻异常带, 推断为岩脉附近节理裂隙密集带; 深部 140—220 号点, 深度介于 750~1 400 m, 出现低阻带, 受场地条件限制无法补测(南侧为海), 推测与 L1 线相近同为深部破碎带。

综合 L1 线、L2 线的视电阻率断面图(图 5), 推断 L1 线 260—340 号点间为煌斑岩及节理裂隙密集带引起, 向深部延伸至 450~750 m, 同时在 L1 线的 107—320 号点处推断深部 1 000~1 250 m 存在低阻异常, 是主要热储层位。

2.3.2 高精度电磁频谱资料解释

根据高精度电磁频谱探测结果, MES07 测点的

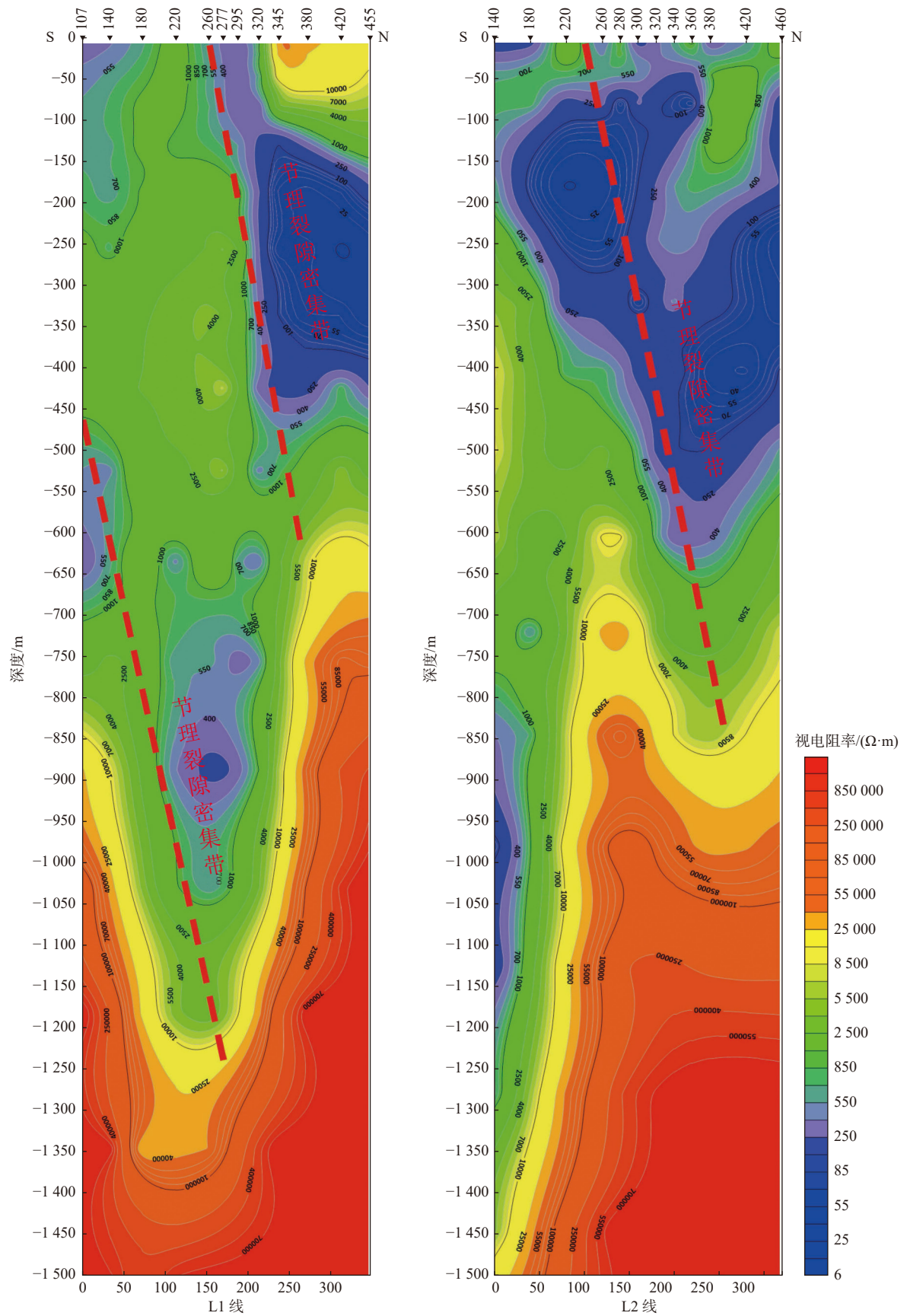


图 5 AMT 法综合解释剖面

Fig.5 AMT comprehensive interpretation profile

视电阻率曲线整体表现为中高阻“锯齿状”、“梳状”中间夹有高阻“尖峰状”的变化特征,局部为相对低阻异常特征;磁场曲线整体表现为相对平滑的弱“锯齿状”特征,局部有略微的高磁异常,主要分布在 342~390、884~913、938~965、1 180~1 200 和 1 546~1 681 m。整体表现为磁异常强度相对较弱,含水层主要为“弱含水层和微弱含水层”,具有一定的富水性。

2.3.3 异常综合解释及热储概念模型分析

由 AMT 法推断,低阻异常带与岛区的中南部 EW 向煌斑岩脉的展布相对应,结合 MES 法探测结果,该段异常区深部具有一定的富水性。综合认为 MES07 点位置(DR01 井位)具有一定的储水条件,含水层以基岩构造裂隙水为主。小管岛地热属传导型地热系统,基本具备地热形成的“源、通、储、盖”4个基本要素(图6)。

(1)源 热源主要为地球深部的热源,通过自然增温形成,以地热水的形式表现,储水层的分布深度越深,温度越高,岛区平均地温梯度为 1.36 °C/hm,

孔底温度 39.2 °C。水源主要为海水补给,其次为大气降水补给,溶解性总固体(TDS)为 24.93 g/L。区内岩石节理裂隙发育,向深部有一定的延伸,地壳深部大地热流是区内热源的主要来源。区内的水源主要为海水,沿断裂构造破碎带、岩石裂隙经深循环和对流作用被本区热源加热后形成地热水。

(2)通道 岛区分布的 2 组 EW 向煌斑岩脉附近,向深部延伸的岩石节理裂隙密集带,可导通深部热源,是地下水的运移通道,具有一定的控热、导水作用。

(3)储层 新元古代的黑云二长花岗岩,构造影响带附近的节理裂隙发育,是较为良好的热储层,厚度约 30.5 m。

(4)盖层 热储上方能够阻止热量向外散失的岩层,小管岛上部完整的基岩作为盖层。

3 钻孔验证

综合研究 AMT 法和 MES 法探测结果,确定地热井的位置。AMT 法从面上控制控热构造的分布,

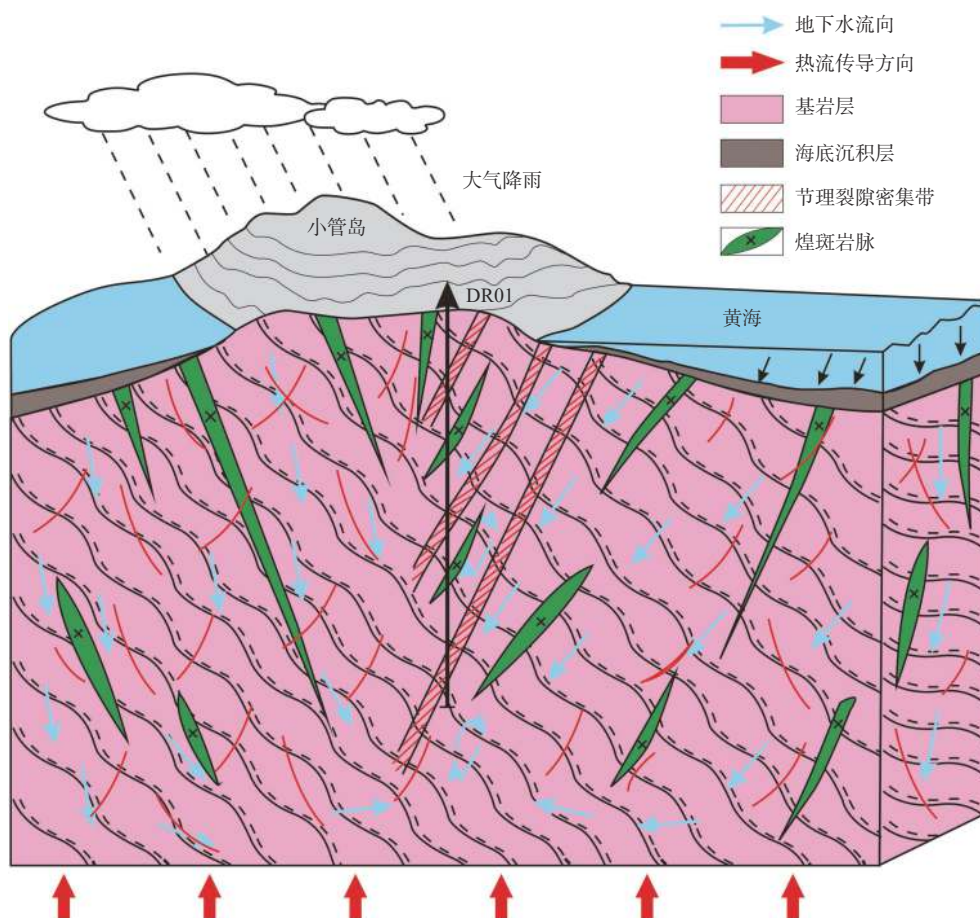


图6 小管岛地热热储概念模型

Fig.6 Conceptual model of geothermal storage in Xiaoguan Island

MES 法从点上确定含水层的分布及富水性特征, 建议的地热井更加可靠。AMT 测深 L1 线位 260 号点附近 (MES07 点) 位置施工 DR01 井验证, 完井深度 1 501.5 m, 揭露含水层 4 段, 分别为 351.33~357.15、617.75~622.55、1170.40~1178.75 和 1437.45~1 448.70 m, 累计厚度约 30.5 m。地热井井口出水

温度 28.3 ℃, 井底温度 39.2 ℃, 涌水量 121.2 m³/d, 属于中低温地热资源。根据 AMT 法 L01 线和 MES07 点综合解释剖面图 (图 7), 结合地热井钻孔柱状图 (图 8) 对比分析可知, 物探成果与地热井资料具有较好的吻合度, 推断的含水层位置、破碎带分布及富水性、与地热井资料基本一致 (表 1)。

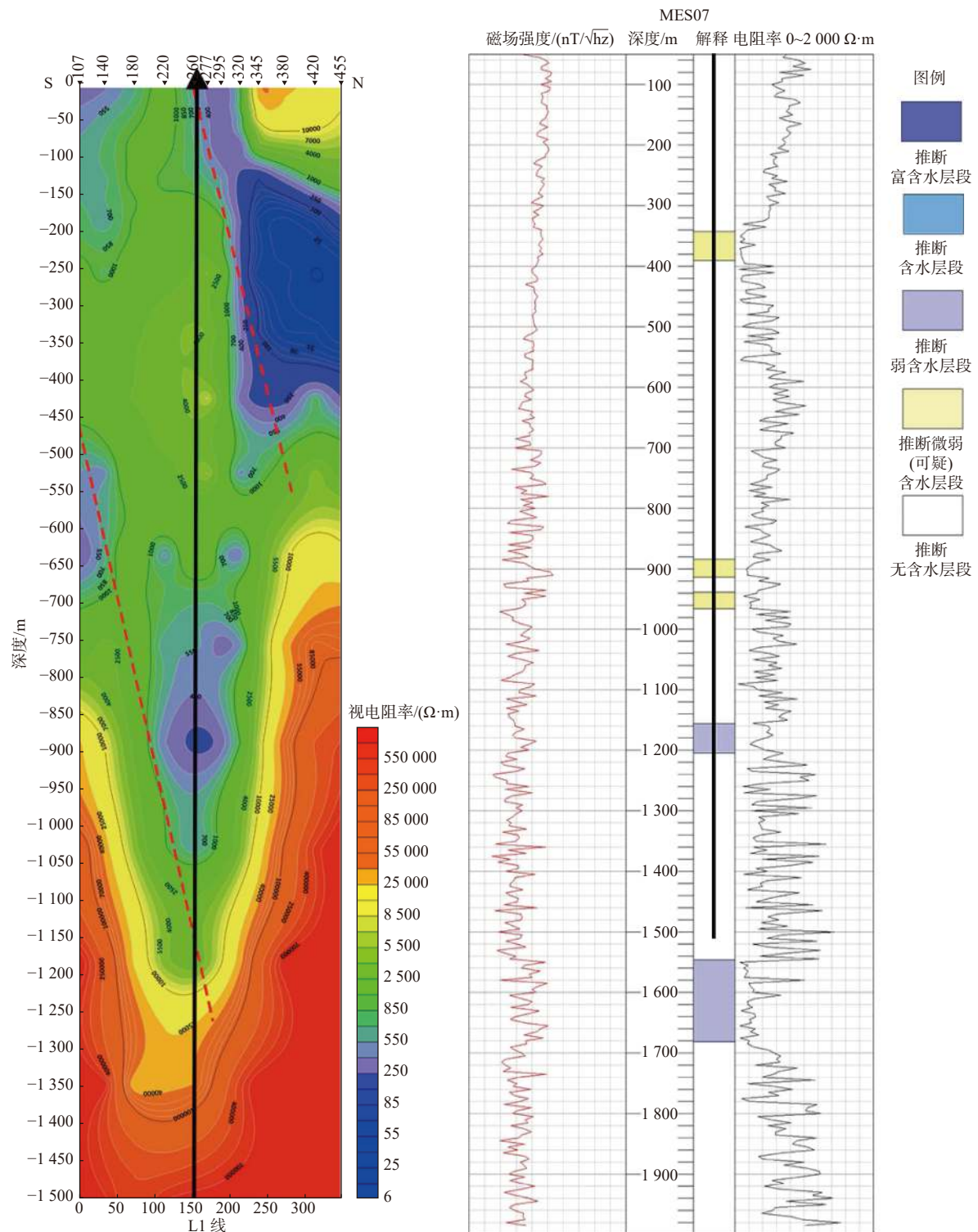


图 7 物探综合解释剖面

Fig.7 Comprehensive interpretation profile of geophysical exploration

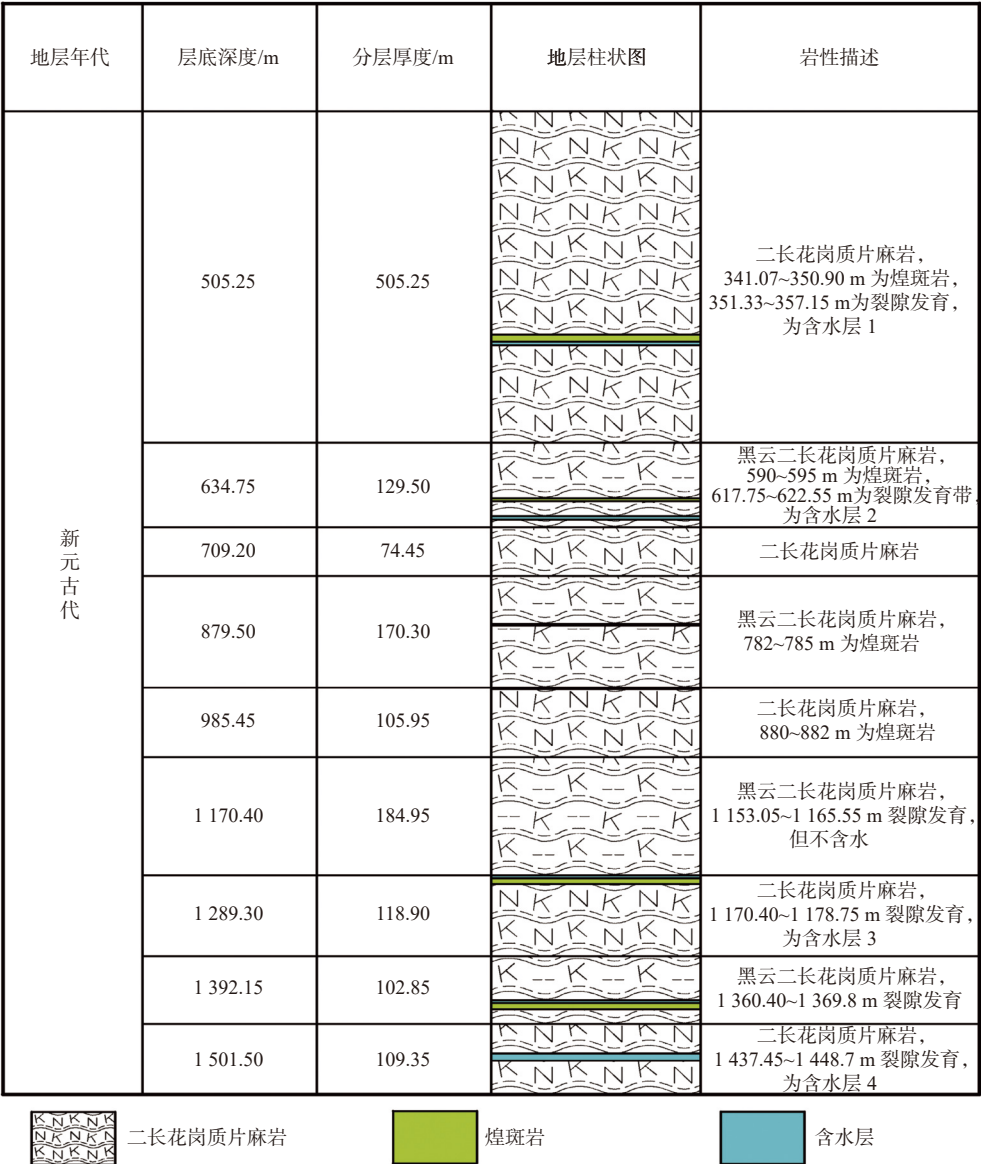


图 8 地热井钻孔柱状图
Fig.8 Column chart of geothermal well drilling

表 1 MES 测深解译结果对比
Table 1 Comparison of MES sounding interpretation results

推断的含水层		探明的含水层		分析总结
含水层1	342~390 m	含水层1	351.33~357.15 m	存在且基本一致
含水层2	884~913 m	含水层2	617.75~622.55 m	存在但深度有偏差
含水层3	938~965 m	/	/	煌斑岩分布段
含水层4	1 180~1 200 m	含水层3	1 170.40~1 178.75 m	存在且基本一致
含水层5	1 546~1 681 m	含水层4	1 437.45~1 448.70 m	有待验证

注：“/” 为无内容。

据水质分析结果,地热流体锶含量为 74.20 mg/L, 达到命名浓度, 命名为锶水。溴含量 26.19 mg/L, 达到命名矿水浓度, 命名溴水, 具有一定的医疗保健价值,可用作理疗、洗浴、温室、养殖等用水。

4 结论

(1)在小管岛采用音频大地电磁测深法和高精

度电磁频谱法进行地热资源勘查定井,优选地热井位置,并成功出水。DR01井井深1 501.5 m,出水温度28.3℃,孔底温度39.2℃,涌水量121.2 m³/d,属于中低温地热资源。

(2)在海岛地区开展地热资源勘查工作,尤其断裂构造不发育地区,重点关注岛区岩脉分布地段,可形成深部延伸的节理裂隙密集带,是相对较好的传导型地热系统分布区。

(3)在海岛地区采用资料收集分析、地热地质调查、地球物理勘查推断及地热地质钻探验证的地热资源勘查方法体系是必要可行的。

(4)在受地形地貌、周围环境等限制的海岛地区,采用音频大地电磁测深法从面上控制主要控热构造的展布,结合高精度电磁频谱法从点上探测含水层的分布及富水性,综合这2种物探方法进行地热资源勘查定井是可行的、有效的。

(5)建议加强深部含水层的富水性与温度方面的研究。

参考文献:

- [1] 刘桂仪,刘洪华,陈奂良,等. 地热资源勘查实务[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 2021.
- [2] 李常锁,杨磊,高卫新,等. 济南北部地热田地热地质特征浅析[J]. 山东国土资源, 2008, 24(4): 39-43.
- [3] 韩立民,王爱香. 保护海岛资源: 科学开发和利用海岛[J]. 海洋开发与管理, 2004, 6: 30-33.
- [4] 李迎朋. 河北省海岛地热综合利用方式探究[J]. 陕西建筑, 2020, 9: 1-3.
- [5] 陈大磊,于嘉宾,王阳,等. 音频大地电磁测量法(AMT)在莒县地区地热勘查中的应用[J]. 山东国土资源, 2016, 32(12): 58-61.
- [6] 雷晓东,杨全合,李晨,等. 北京凤河营地热田东北部综合地球物理勘探[J]. 物探与化探, 2004, 39(4): 249-255.
- [7] 徐光辉,黄力军,刘瑞德. 应用可控源音频大地电磁测深于北京水文地质勘查[J]. 物探与化探, 2005, 29(6): 523-525.
- [8] 万明浩,王家林,吴健生,等. 江苏句容-常州地区综合地球物理研究[J]. 地球物理学报, 1993, 36: 791-797.
- [9] 吴璐萍,石昆法,李荫槐,等. 可控源音频大地电磁法在地下水勘查中的应用研究[J]. 地球物理学报, 1996, 39(5): 712-717.
- [10] 叶益信,邓居智,方根显. 高频大地电磁测深(EH-4)在热储构造勘查中的试验研究: 以抚州地热区为例[J]. 地质与勘探, 2011, 47(4): 649-653.
- [11] 汪琪,赵志鹏,尹秉喜,等. 电磁测深MT法在平原深部地热调查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2016, 13(6): 782-787.
- [12] 王佳龙,张宝松,陈基伟,等. 大地电磁测深不同反演方法的应用效果对比: 以安徽皖江地区页岩气调查为例[J]. 华东地质, 2020, 41(1): 79-87.
- [13] 柳建新,童孝忠,郭荣文,等. 大地电磁测深法勘探: 资料处理、反演与解释[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [14] 李帝铨,胡艳芳. 强干扰矿中广域电磁法与CSAMT探测效果对比[J]. 物探与化探, 2015, 39(5): 967-972.
- [15] 陈斌. CSAMT法与微动测深法在漳州某区地热资源勘探中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2021, 1: 64-69.
- [16] 秦福锋,许丙彩,冯英明,等. 日照东部地区地热资源成因分布规律及勘查定井方法研究[J]. 山东国土资源, 2021, 37(9): 36-45.

The well determination for geothermal resource exploration in typical islands in Xiaoguan Island, Qingdao

HE Peng^{1,2,3}, DONG Jie^{1,2}, GUAN Yong^{1,2}, WANG Qing^{1,2}, XIE Yongjian^{1,2*},
LIU Haisong^{1,2,3}, YIN Zheng^{1,2}, FU Jiani^{1,2}

(1 Key Laboratory of Urban Geology and Underground Space Resources, Shandong Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources, Qingdao 266100, China; 2 Qingdao Geo-Engineering Surveying Institute (Qingdao Geological Exploration Development Bureau) Qingdao 266071, China; 3 Qingdao Geological and Mineral Geotechnical Engineering Co. Ltd., Qingdao 266071, China)

Abstract: The geological environment conditions in island area are relatively complex, with large topographical fluctuations, various types of landforms, and special geothermal geological conditions. Choosing appropriate methods for geothermal resource exploration and well location is of great significance for the exploration and development of geothermal resources. Taking the geothermal resource exploration on Xiaoguan Island in Qingdao City as an example, we comprehensively analyzed the geothermal condition and compared the advantages and disadvantages of geophysical prospecting methods for geothermal resource exploration. Besides, by combining audio magnetotelluric (AMT) sounding method with high precision electromagnetic spectrum (MES) method, we interpreted the results of the two geophysical prospecting methods, obtained a conceptual model of thermal storage in the island area, identified the location of geothermal wells, and successfully constructed a 1 500 m-deep geothermal well with a daily water output of 121.2 m³ and a 39.2 °C of bottom hole temperature. This study justified the feasibility and effectiveness of applying AMT and MES methods to explore geothermal resources in the island area.

Key words: typical islands; geothermal resources; exploration and well location methods; AMT method; MES method