

doi: 10.11720/wtyht.2023.1205

王军成, 赵振国, 高士银, 等. 综合物探方法在滨海县月亮湾地热资源勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2023, 47(2): 321-330. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1205>

Wang J C, Zhao Z G, Gao S Y, et al. Application of a comprehensive geophysical exploration methods in the exploration of geothermal resources in Yuelian-gwan, Binhai County[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2023, 47(2): 321-330. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2023.1205>

# 综合物探方法在滨海县月亮湾地热资源勘查中的应用

王军成<sup>1,4</sup>, 赵振国<sup>2</sup>, 高士银<sup>1,4</sup>, 罗传根<sup>1,4</sup>, 李琳<sup>1,4</sup>, 徐明钻<sup>1,4</sup>, 李勇<sup>3</sup>, 袁国境<sup>3</sup>

(1. 江苏省地质勘查技术院, 江苏 南京 210049; 2. 中交公路规划设计院有限公司, 北京 100088; 3. 北京中科地垣科技有限公司, 北京 100083; 4. 江苏省航空对地探测与智能感知工程研究中心, 江苏 南京 210049)

**摘要:** 采用可控源音频大地电磁法和广域电磁法在江苏省滨海县月亮湾进行地热资源勘查, 对可控源音频大地电磁法数据进行近场和过渡场曲线辅助校正和反演约束, 获得滨海港地下地热资源电性结构信息, 同时采用微动探测方法获得地下几何结构信息。综合分析 3 种地球物理资料进行解释结果, 获得研究区地热模型, 确定异常位置, 随后钻井深度 2 919 m, 出水量 2 171 m<sup>3</sup>/d, 水温 51 °C, 综合物探成果与地质及地热井资料高度吻合, 说明运用综合物探方法进行地热勘查, 提高了勘探结果的可靠性。

**关键词:** 地热资源勘查; 可控源音频大地电磁法; 广域电磁法; 微动探测; 综合物探方法

**中图分类号:** P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2023)02-0321-10

## 0 引言

地热资源是一种清洁的可再生清洁能源, 其空间分布广泛、稳定性好、效率高, 拥有悠久的利用历史, 在国家“碳中和”、“碳达峰”战略实施的背景下, 地热资源的开发对发展低碳经济起着重要作用<sup>[1]</sup>。作为对环境友好的无损勘探方法, 物探技术在深部探测优势明显, 可有效探测深部隐伏断裂构造(地下热水通道和储层)、获取地层及其埋藏深度等重要信息, 为地热井井位选址提供重要依据, 其在地热资源勘查中有很好的应用前景, 将是今后地热资源勘探的方向和发展趋势<sup>[2-3]</sup>。

目前重、磁、电、震、放等方法技术在地热资源勘查中均有使用, 由于不同方法存在不同的应用范围, 并且物探方法存在多解性, 使用单一方法探测, 有一定的局限性和不确定性, 因此综合物探方法的使用显得尤为重要<sup>[4-5]</sup>。本文以江苏省滨海县月亮湾地热资源勘查为例, 探讨综合物探技术

在地热资源勘查中的应用效果, 可为今后寻找类似地热资源提供借鉴。

## 1 研究区地质概况

研究区位于盐城市滨海县东部, 地层隶属于扬子地层区, 区内未见基岩出露, 地表被新生界地层所覆盖, 松散层(第四系 Q + 新近系 N) 厚度大约为 300~500 m。据钻孔揭露, 研究区内基岩地层由老到新依次为奥陶系(O) 浅海相碳酸盐岩、志留—泥盆系(S-D) 海相碎屑岩、石炭—二叠系(C-P) 浅海相碳酸盐岩及碎屑岩夹含煤碎屑岩以及白垩系(K)、古近系(E) 陆相碎屑岩(图 1)。

研究区处于下扬子陆块之苏北盆地的滨海隆起, 大致以 F<sub>5</sub>(八滩—小街断裂) 断裂为界线, 褶皱 A3(八滩南—大淤尖背斜) 及 A2(滨淮倒转向斜) 分别位于 F<sub>5</sub> 的南北两侧(图 1)。F<sub>5</sub> 断裂是本次勘查的重点, 它破坏了褶皱 A2 与 A3 的完整性, 其走向约 60°, 倾向 SE, 倾角约 50°~60°, 长约 34 km, 控

收稿日期: 2022-04-22; 修回日期: 2022-07-31

基金项目: 中国地质调查局项目“长江中下游成矿带地质矿产调查”(1212011220540)、“江苏 1:5 万丁三圩、开山岛、洋桥镇、陈家港、新淮河口、响水口、大有镇、小街、大淤尖幅区调”(基[2012]02-014-009、基[2013]01-019-002、基[2014]01-021-003)

第一作者: 王军成(1982-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事地球物理勘查工作。Email: aoyun1011@163.com

制了奥陶系(O)与志留系(S)的界线,南侧大多被古近系(E)所覆盖<sup>[6]</sup>。

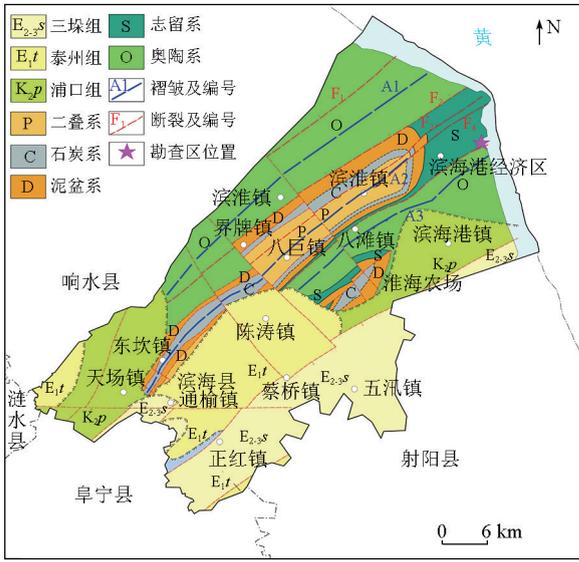


图1 研究区区域地质构造

Fig. 1 Regional geological structure map of the research area

研究区岩石圈厚度约80~100 km,居里面(560℃)深度约25~30 km,大地热流值约70 mw/m<sup>2</sup>,地温梯度低于27℃/km。按当地2.7℃/100 m的地温梯度计算,排除其他活动的影响,理论上本区含水层埋深1 000 m时,地热水温可达约42℃;埋深2 000 m

时,可达约69℃。区内断裂构造非常发育,其中NE向断裂F<sub>5</sub>为研究区内控热、控水构造。研究区深部为奥陶系灰岩地层,在断裂构造作用下形成的裂隙是良好的含水热储层,其断裂构造裂隙层是本研究区地热水资源勘查的最佳目标层位。地热盖层主要有第四系、新近系盐城组上段,厚度为240~380 m,以黏土与砂层间互沉积;其中黏性土隔水性强,热导率相对较低,保温性良好。基于以上分析,研究区在“源、通、储、盖”这4个方面都基本具备了形成地下热水的地热地质条件。

## 2 地层物性特征

收集区域电阻率、波速参数综合统计于表1,从统计结果可看出地层岩石电阻率特征:新生界为低阻,上古生界碎屑岩为低阻、碳酸盐岩为高阻;地层电阻率从上而下表现为低—中低—高一中低—高,当地层破碎时电阻率明显降低。波速特征:基岩与上覆地层波速差异明显,由浅至深波速逐渐增大;当断裂引起基岩错动或明显破碎时,将出现地层的错动或缺失,波速明显减弱。上述物性特征为本次采用电磁法、微动勘查地层结构和断裂构造,进而推断地热资源提供了良好的电性前提条件。

表1 地层岩石电阻率参数统计

Table 1 Statistics of formation rock resistivity parameters

地层	岩性	电阻率/(Ω·m)			综合特征	波速特征/(m·s <sup>-1</sup> )
		标本测定	测井	MT 反演		
Q	砂质黏土、粉砂、黏土、砂砾层	16	13.2	52.1	低阻层	900~1800
N	砂岩、泥岩	8.7	8.3	24.1	低阻层	1900~2400
E <sub>2-3s</sub>	砂岩、泥岩夹玄武岩		6.6	12.7	低阻层	
E <sub>2d</sub>	砂岩、泥岩	3.9	6.1	11.6	低阻层	2200~4200
E <sub>1f</sub>	砂、泥岩夹玄武岩		3.9	5.8	低阻层	
E <sub>1t</sub>	砂岩、泥岩		5.4	6.9	低阻层	
K <sub>2p</sub>	粉砂岩	136	18.6	34	中低阻层	
P <sub>3d</sub>	页岩、泥灰岩	388	68	99.8	中低阻层	
P <sub>2l</sub>	页岩、粉砂质泥岩、岩屑砂岩	282	37	96	中低阻层	4000~4700
P <sub>1g</sub>	硅质岩、页岩、泥岩、粉砂岩	467	8	125	中低阻层	
P <sub>1q</sub>	灰岩	4059	684	226	高阻层	
C <sub>2</sub>	灰岩	2538	529	153	高阻层	
C <sub>1</sub>	灰岩、砂岩、泥岩	1950	517	165	高阻层	
D <sub>3w</sub>	石英砂岩	381	362	113	中低阻层	
S <sub>2m</sub>	石英砂岩	351	404	134	中低阻层	
S <sub>1f</sub>	粉砂质泥岩	94	198	44	中低阻层	
O <sub>3</sub> S <sub>1g</sub>	泥岩、粉砂质泥岩、泥质粉砂岩	193	95	28	中低阻层	5000
O <sub>3w</sub>	泥岩	151	26	26	中低阻层	
O <sub>1-2</sub>	灰岩、白云岩、泥灰岩	1134	330	115	高阻层	
Є <sub>2-3</sub>	白云岩、白云质灰岩、灰岩	1504	462	143	高阻层	
Є <sub>1m</sub>	炭质泥页岩、灰岩、白云岩、硅质岩	507		163	高阻层	

### 3 方法技术

由于可控源音频大地电磁法(CSAMMT)施工效率高,成本低,适合大面积施工,广域电磁法(WFEM)有效探测深度大,分辨率高,而微动施工效率低,成本高,故本次研究工作以 CSAMMT 勘查为主,WFEM 及微动探测复核及评价。布置 3 条平行测线均垂直于断裂构造  $F_5$ (图 2)。根据 CSAMMT 法成果初步确定地热井井位,并在井位附近(L2 线上)分别开展 WFEM 法和微动探测工作,以进一步确定地热井井位。

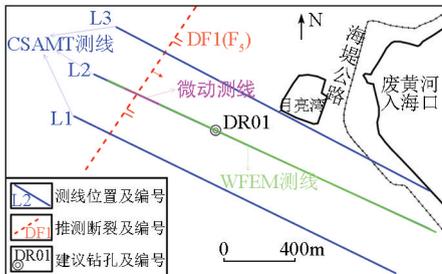


图 2 测线位置

Fig. 2 Location map of survey line

#### 3.1 CSAMMT 法

##### 3.1.1 CSAMMT 法技术参数

CSAMMT 法采用赤道偶极装置观测与场源正交的磁场水平分量  $H_y$  及与场源平行的电场水平分量  $E_x$ , 计算卡尼亚视电阻率  $\rho_s$  [7]。其计算公式为:

$$\rho_s = \frac{1}{5f} \frac{|E_x|^2}{|H_y|^2}, \quad (1)$$

式中:  $f$  表示频率。

本次 CSAMMT 法采用加拿大产 V8 电法系统,发射偶极  $AB$  长 1.75 km, 平行于测线布设,  $AB$  到测线的距离在 8~10 km 范围内。本次采集频率选择 0.125~9 600 Hz, 发射的最大电流达到 18 A, 接收点距 50 m [8], 其野外工作方法如图 3 所示。

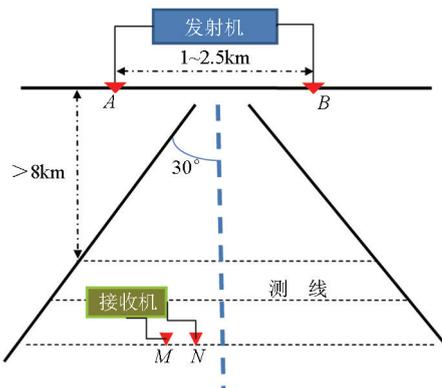


图 3 CSAMMT/WFEM 法工作示意

Fig. 3 Working diagram of CSAMMT or WFEM

##### 3.1.2 CSAMMT 法资料处理

本次数据处理引入了 AMT 资料对近场和过渡场曲线进行辅助校正和反演约束,尽可能地还原近场和过渡场数据的真实性 [9]。

图 4 是本次 L2 测线上某点通过上述方法校正前后的对比,由图可以看出:该点原始视电阻率曲线在 20 Hz 以下发生严重的畸变,经全频域视电阻率校正过后的 CSAMMT 曲线,虽然在一定程度上对过渡区和近区数据进行了校正 [10],但仍然存在校正不足的问题;结合该点的 AMT 视电阻率曲线,对校正后的视电阻率曲线再次进行校正,过渡区的曲线形态得到了更好的校正。

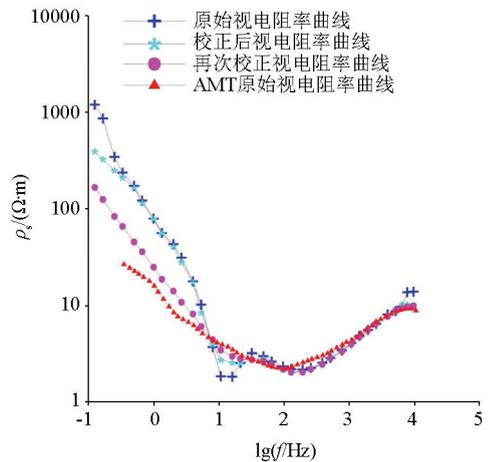


图 4 校正前后曲线对比

Fig. 4 Curve comparison before and after correction

对 CSAMMT 数据进行近区和过渡区校正后的视电阻率曲线基本等同于 AMT 测量结果 [11], 可利用较为完善的 AMT 的处理方法对校正后的 CSAMMT 数据进行反演处理。

图 5a 是未经近场校正的 CSAMMT 反演断面,在勘探深度约 900 m 之后形成一个高阻的基底,这显然是近场数据畸变造成的数据失真,同时也掩盖了深部地层和构造信息,浅部是远区的数据,对地层和构造的反应还是真实可信的。

图 5b 是用实测的卡尼亚视电阻率直接计算全频域的视电阻率法校正过的数据反演的断面,与图 5a 相比,其反映的高阻基底深度相对增加,被高阻基底掩盖的构造形态也初步显现了出来,地层界线也更加明显,但反映的地层深度还是有所偏差。

图 5c 则是结合 AMT 视电阻率曲线,对校正后的视电阻率曲线再次进行校正后的数据反演断面。经上述方法校正后剖面整体受到近场效应的影响得到较大改善,深部地质信息更加清晰,保证了勘探

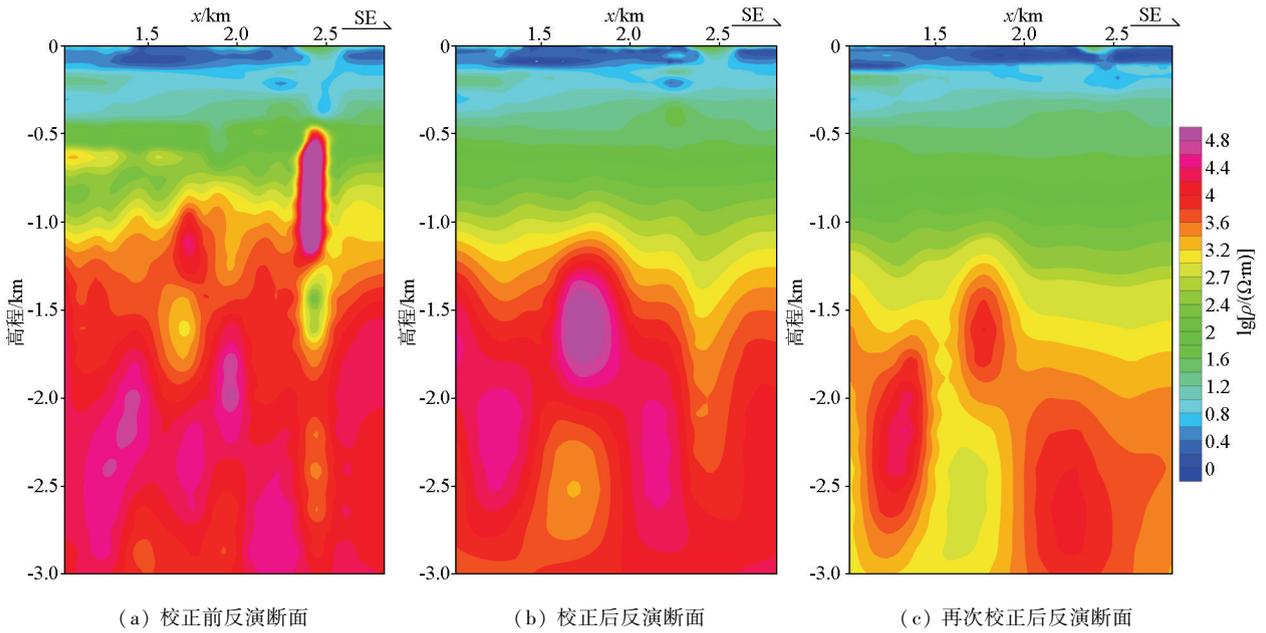


图 5 L2 线校正前后对比

Fig. 5 Comparison diagram before and after correction of L2

深度,而且其成果与后期钻探所掌握的地层深度高度一致。

### 3.2 WFEM 法

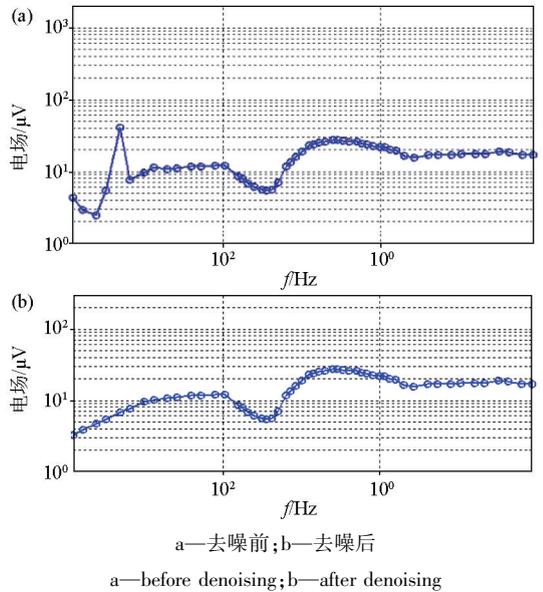
WFEM 法是相对于传统的 CSAMT 及 MELOS 法的基础上提出的,采用更大功率的人工源发射电流,只观测电场分量,使用适合于全域的公式来计算广域视电阻率,以达到探测不同埋深地质目标体的频率域电磁测深方法<sup>[12]</sup>。

本次 WFEM 法采用继善高科研发的广域电磁系统,AB 偶极布设长度 1.2 km 左右,收发距大于 12 km,接收测线信号均落在 AB 电极中间张角 60° 范围内,接收点距 50 m,与 CSAMT 工作同点位,采集频率选择为 0.011 7~8 192 Hz,发射电流最大 146 A,WFEM 法的野外工作方式与 CSAMT 法类似(图 3)。

研究区内的道路、工地、电线等影响了电场采集信号,致使电场有一定的畸变,采取加权正演去噪处理(图 6),曲线明显变得光滑。

研究区近地表局部导电性存在不均匀,从而引起了静态位移,需进行静态校正。图 7 可以看出,通过静态校正处理后,数据得到明显改善,最后用静态校正后的电场计算广域视电阻率<sup>[13]</sup>。

WFEM 法带源反演采用的是 GMES\_3DI 重磁地震三维反演成像解释一体化系统<sup>[14]</sup>,通过调节正则化参数来达到控制反演结果光滑程度和分辨率<sup>[15]</sup>的目的,通常光滑模型反演算法是通过使模型粗糙度最小来达到压制干扰的目的。



a—去噪前;b—去噪后

a—before denoising;b—after denoising

图 6 去噪处理

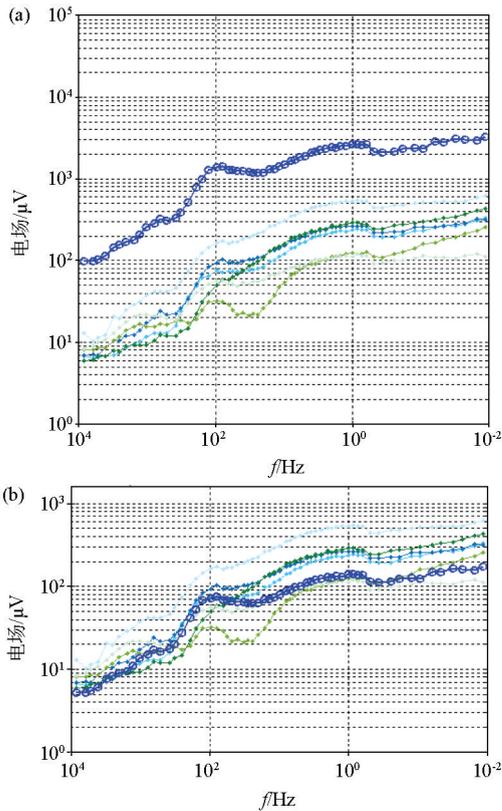
Fig. 6 Denoising processing

### 3.3 微动探测

微动探测通过圆形台阵获取微弱振动信号中面波(瑞雷波)的频散曲线,求取台阵下方 S 波的速度特征,进而推测地层、结构特征<sup>[16]</sup>。

本次微动探测采用美国 A-tom 单站式地震仪。观测时采用的是 0.1 Hz 检波器进行接收,每个测点周围均布设了 13 个采集器,以四重圆台阵观测系统进行采集,其半径分别为 375、750、1 125、1 500 m,共计布置了 6 个测点(图 8)。

本次微动探测采用规则的四重圆台阵观测,采用空间自相关法(SPAC)提取微动信号中的瑞雷波



a—处理前;b—处理后  
a—before correction;b—after correction

图 7 静态校正

Fig. 7 Static correction

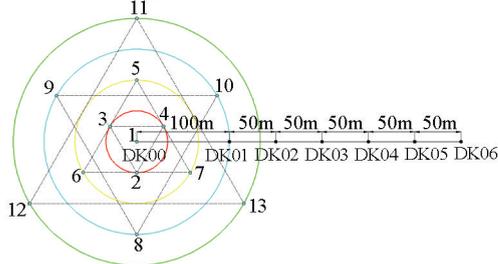


图 8 四重圆台阵观测示意

Fig. 8 Observation diagram of quadruple circular array

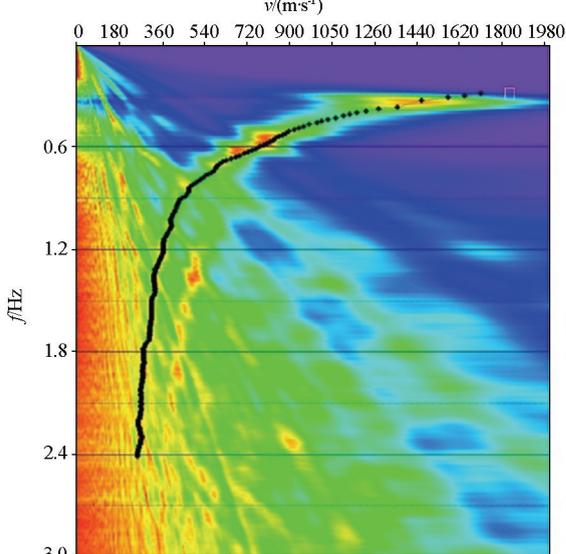


图 9 DK01 点频散曲线

Fig. 9 Dispersion curve of point DK01

频散曲线<sup>[17]</sup>。图 9 是 DK01 点频散曲线,其低频在 0.3~0.5 Hz 左右,频散曲线整体光滑,质量较好。

微动探测是在计算出频散曲线的基础上,求取台阵中心点下方的视横波波速结构,由多个台阵测点的视横波速度进行插值,获得视横波波速剖面<sup>[18]</sup>。

## 4 资料综合解释

### 4.1 CSAMT 法资料解释

经对近场和过渡场曲线进行辅助校正和反演约束后,3 条 CSAMT 成果如图 10 所示,由图可以看出剖面清晰地反映出了 3 000 m 深度范围内的地层、构造特征。

结合研究区地质、物性资料,将反演电阻率断面上反映出的 3 000 m 范围内的地层大致分为 3 个大的电性层:第一层厚度约为 300 m,具低阻特征,推测是第四系和新近系(Q+N)松散层的反映;第二层厚度约为 900 m,呈中低阻特征,推测是志留系(S)海相碎屑岩地层的反映;第三层厚度较大,具高阻特征,推测为奥陶系(O)浅海相碳酸盐岩夹海陆交互碎屑岩地层的反映。

断裂构造推断依据:电阻率断面图横向上出现电阻率阶跃状突变或纵向上见陡立的低阻异常一般是判断断裂构造的主要标志。反演电阻率断面上存在这些电阻率横向突变带,被推断由断层所致<sup>[19]</sup>。

从 3 条 CSAMT 反演电阻率剖面图看,均有明显的断裂构造迹象,并且 3 条剖面上的断裂构造在空间位置上对应较好,推断为同一条断裂,即 DF<sub>1</sub> 断裂(如图 10)。该断裂分别穿过 L1 线 1 200 m, L2 线的 1 250 m 以及 L3 线的 1 200 m 附近,均呈明显的低阻异常反映。其中, L3 线经过宽大的水面及建筑工地,干扰严重且测线无法完全展布,对断裂构造反映尚有欠缺。L1、L3 线大号点存在左倾断裂,为干扰引起。

### 4.2 WFEM 法资料解释

本次广域电磁法工作在 L2 线 1.3~2.9 km 范围内开展,其解释剖面如图 11 所示。由图可以看出地层呈明显的层状分布:第一层深 0~0.3 km 为低阻层,是第四系和新近系(Q+N)松散层的反映;第二层深 0.3~1.2 km 为中低阻层,是志留系(S)海相碎屑岩地层的反映;第三层深 1.2~3.1 km 为高阻层,是奥陶系(O)浅海相碳酸盐岩地层的反映;由于该方法探测深度相对较深,可发现 3.1 km 以下位置存在中高阻层,推测是寒武系(ε)浅海相碳酸盐岩

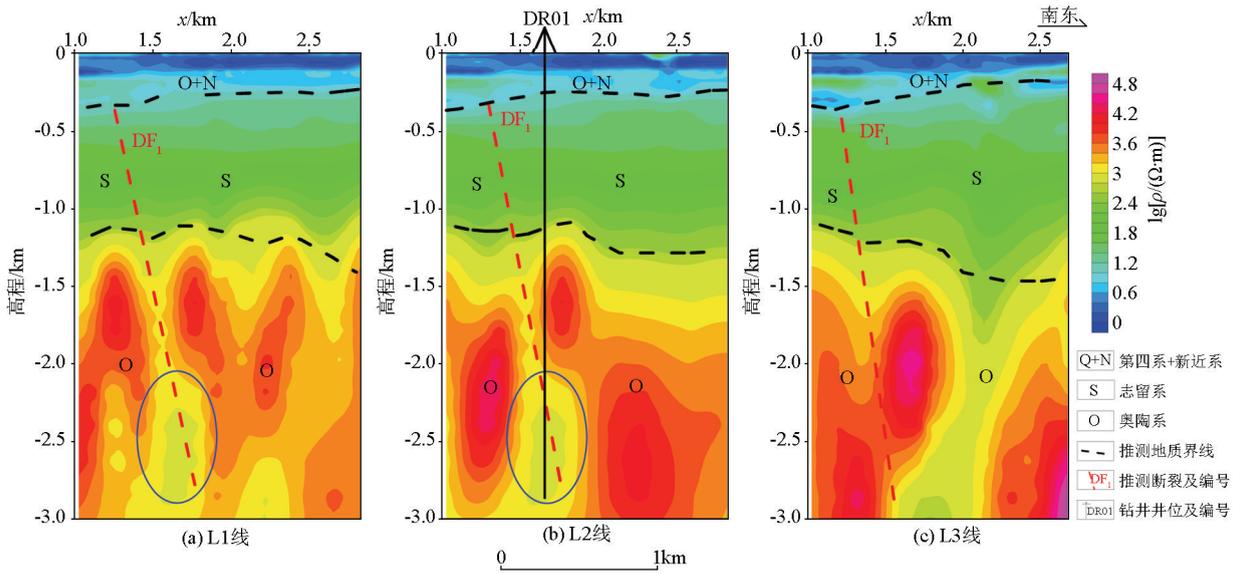


图 10 CSAMT 法综合解释剖面

Fig. 10 Comprehensive interpretation profile of CSAMT

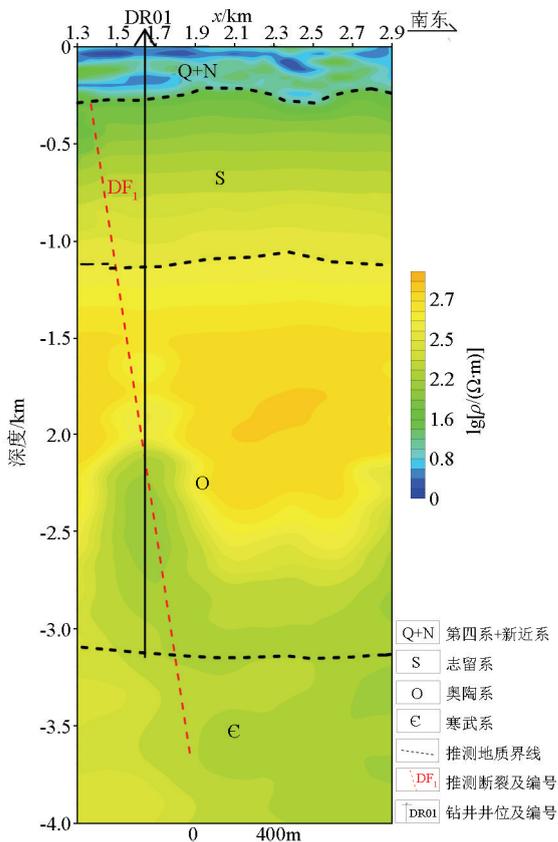


图 11 L2 线 WFEM 法综合解释剖面

Fig. 11 Comprehensive interpretation profile of WFEM of L2

夹碎屑岩的反映。

剖面 1.65 km 附近,深 1 km 以下电阻率呈现明显的低阻反演,推测该位置存在断裂构造,即为 L2 线 CSAMT 成果中的 DF<sub>1</sub> 断裂。受其影响,深部岩层破碎含水,电阻率明显降低,尤其 2.5 km 以下呈

现大范围低阻异常,与 CSAMT 法对比,结合 DF<sub>1</sub> 构造特征,WFEM 法在深 2.5 km 以深所反映出的地质信息更符合实际,更加可信,体现出了其大勘探深度的优势。

### 4.3 微动探测资料解释

图 12 是微动横波速度解释断面,其波速仅反映地层相对速度。结合研究区地质资料,由图可以看出微动剖面范围内速度呈现明显的层状反映,第一层速度小于 470 m/s,层厚约 300 m,推测是第四系和新近系(Q+N)松散层的反映;第二层速度 470~

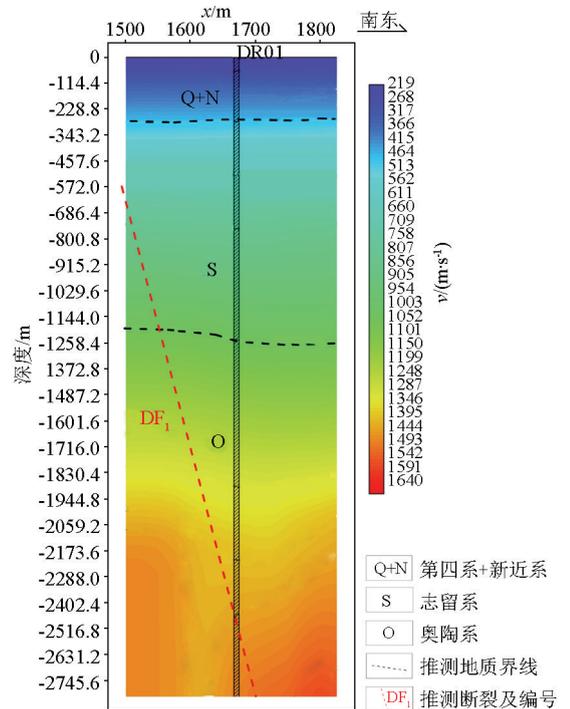


图 12 微动解释断面

Fig. 12 Interpretation Section of fretting detection

1 050 m/s,层厚 800 m 左右,推测是志留系(S)海相碎屑岩地层的反映;第三层速度大于 1 050 m/s,推测为奥陶系(O)浅海相碳酸盐岩地层的反映。在建议的 DR01 孔深部附近,速度呈现明显的低速,推测可能是岩层发生了破碎,富水性较强的原因所致。

#### 4.4 异常综合解释及模型特征分析

由 CSAMT 法推断、WFEM 法以及微动探测辅助评价印证结果表明,DF<sub>1</sub> 断裂构造与八滩—小街断裂(F<sub>5</sub>)对应,结合研究区地质资料分析认为,该断裂构造为该区地热通道,建议的 DR01 地热井储水条件较好,含水层(组)以基岩构造裂隙水和岩溶水为主;其上覆 300 多米的第四系及新近系(Q+N)是相对较好的地热盖层。

研究区地热水主要由大气降水提供补给,其次是弱含水层的越流补给及构造破碎带内的垂直补给。当地下水贮存于构造裂隙以及岩溶裂隙之中时能够原地静态地接收来自地球深部的热量(由自然增温形成,而且温度和深度大致呈线性关系),同时围岩中的微量元素被不断吸收。控制性断裂 F<sub>5</sub>(八滩—小街断裂)为 NE 向的张性断裂,而且 F<sub>5</sub> 处于断裂的开启状态,对地下热水的运移和储存都十分有利。总结出的研究区地热模型如图 13 所示。

地热源:总体属于地温正常场区,地热主要是通过自然增温形成,以水流体的形式表现;储水层埋藏越深,温度通常也就越高。按当地 2.7 °C/100 m 的地温梯度计算<sup>[20]</sup>,排除其他活动的影响,理论上本区含水层埋深 1 000 m 时,地热水温可达 42 °C;埋深 2 000 m 时,可达 69 °C。

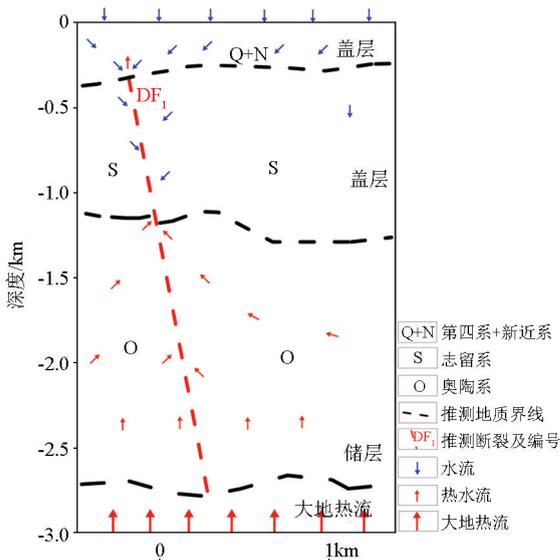


图 13 研究区预测地热模型概念

Fig. 13 Conceptual diagram of prediction geothermal model of research area

地热通道:深部热源沿断裂或由岩浆带至浅部;水源通过断裂或裂隙运移。NE 向断裂 F<sub>5</sub> 为研究区内控热、控水构造。伴随着长期的构造活动,不仅加强了与深部热源之间的沟通,同时也能使深部含水层的富水性有所增强<sup>[21]</sup>。

地热储层:深部为奥陶系灰岩地层,裂隙是良好的含水热储层。

盖层:本区地热盖层主要有第四系、新近系盐城组上段,厚度为 240~380 m,以黏土与砂层间互沉积;其中黏性土隔水性强,热导率相对较低,保温性良好<sup>[22]</sup>。

## 5 钻孔验证

综合 CSAMT 法、WFEM 法及微动探测结果所划分的地层和推测的断裂构造基本一致,成果相互印证,达到了 WFEM 法和微动探测对 CSAMT 法进一步评价、印证的效果,建议的钻孔更加可靠。经 DR01 钻探验证,在 1 217~2 919 m 井段断裂裂隙发育,可作为地热井主要含水段的裂隙带共有 16 层,累积厚度 274.30 m。该井井口水温 51 °C,日出水量达 2 000 m<sup>3</sup> 以上,终孔深度 2 919 m,遇钻情况如表 2。图 14 为 CSAMT 法 L2 线综合解释剖面与地热井成井柱状图的验证对比,由图可知,物探成果与地热井资料吻合较好,推断的地层厚度及含水破碎带位置与钻孔资料高度一致。

本次地热流体中阳离子以 Na<sup>+</sup> 离子为主,阴离子以 Cl<sup>-</sup> 离子为主,地热流体的水化学类型为 Cl-Na 型水。该地热水矿化度为 3 388 mg/L,按矿化度分类属咸水;pH 值 7.5,按酸碱度分类属碱性水;热水中所含钙、镁离子的毫摩尔当量为 11.41 mmol/L,

表 2 DR01 地热井遇钻情况统计

Table 2 Statistics of drilling conditions of geothermal well

地层	厚度/m	岩性描述
第四系+新近系(Q+N)	0~315	棕色、灰黄色粉砂质黏土为主,夹细砂、中粗砂
志留系(S)	315~1116	灰白、灰绿色砂岩、长石石英细砂岩、粉砂岩为主,夹杂色、紫色泥岩,局部含硅质条带
奥陶系中—上统(O <sub>2-3</sub> )	1116~2800	灰白色、灰色灰岩、细晶灰岩、泥灰岩为主,局部夹泥岩、页岩,裂隙较发育
奥陶系下统(O <sub>1</sub> )	2800~2919	浅灰—灰白色白云质灰岩

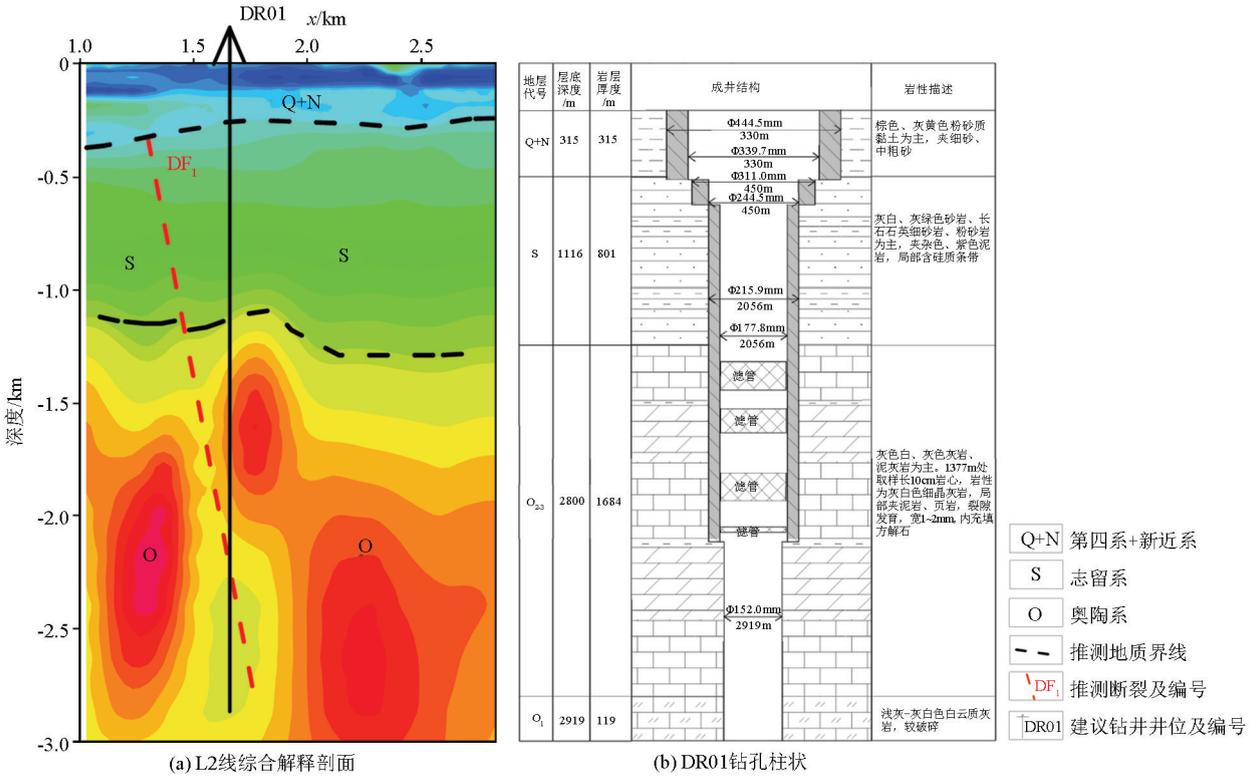


图 14 CSAMT 法综合解释剖面与钻孔验证对比

Fig. 14 The comparison diagram of comparative chart of CSAMT and borehole verification

按地下水硬度分类为极硬水;该井出水水温达 51 ℃,按地热资源温度分级为低温地热资源中的温热水,可用于理疗、洗浴、采暖、温室、养殖等。

### 6 结语

1) CSAMT 法在资料处理过程中引入了 AMT 资料对近场和过渡场曲线进行辅助校正和反演约束的处理手段,提高了成果对深部构造和地层的反映能力,使反演推断结果更加准确。

2) WFEM 法有效探测深度明显比 CSAMT 法要深,虽然本次 CSAMT 通过数据处理,其解释成果资料达到了 3 000 m,但是其深部可靠性要低于 WFEM 法。

3) 通过以 CSAMT 法为主、WFEM 法及微动探测为辅的综合物探方法,获取了研究区深部电性、速度特征和模型特征。分析认为:研究区在“源、通、储、盖”这 4 个方面都基本具备了形成地下热水的地热地质条件,NE 向断裂 F<sub>5</sub>(八滩—小街断裂)及其周围较发育的裂隙为本区的储水构造和热源通道,保温盖层为区内相对较厚的松散沉积层,为裂隙型带状热储类型。

4) 优选了地热井 1 处,并成功出水。其揭示的含水破碎带位置、地层层位与综合物探成果推断高度吻合,证实了综合物探方法技术的有效性,也表明了 WFEM 法在有效压制干扰的同时还能保证勘探深度,优势明显,可作为地热资源勘查的首选方法。

### 参考文献 (References):

[1] 李麒麟,李荣亮,苏海伦,等. 甘肃临泽县城区深部地热资源调查评价[J]. 物探与化探,2020,44(5):999-1008.  
Li Q L, Li R L, Su H L, et al. Investigation evaluation and method study of deep geothermal resources in Linze County, Gansu Province[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 999-1008.

[2] 胡宁,张良红,高海发. 综合物探方法在嘉兴地热勘查中的应用[J]. 物探与化探,2011,35(3):319-324.  
Hu N, Zhang L H, Gao H F. The application of integrated geophysical exploration to geothermal exploration in Jiaxing City[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2011, 35(3): 319-324.

[3] 李丛,张平,代磊,等. 综合物探在中深层地热勘查的应用研究[J]. 地球物理学进展,2021,36(2):611-617.  
Li C, Zhang P, Dai L, et al. Research on the application of comprehensive geophysical prospecting in middle-deep geothermal exploration[J]. Progress in Geophysics, 2021, 36(2): 611-617.

[4] 刁天仁,杜霖. 综合物探方法在安徽省岳西县溪沸地热勘探中的应用[J]. 工程地球物理学报,2019,16(6):815-821.

- Diao T R, Du F. Application of integrated geophysical exploration method to Xifei geothermal exploration in Yuexi County of Anhui Province[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2019, 16(6): 815-821.
- [5] 韩冀春, 李祥新, 于建文. 综合地物化方法在张家口北部地热资源调查中的应用[J]. 物探化探计算技术, 2018, 40(3): 372-377.
- Han J C, Li X X, Yu J W. The application of comprehensive geophysical and geochemical method in geothermal resources investigation in northern Zhangjiakou[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 40(3): 372-377.
- [6] 刘峰, 张洋洋, 朱鹏, 等. 苏北盆地滨海隆起月亮湾地热资源特征[J]. 地质学刊, 2021, 45(1): 69-74.
- Liu F, Zhang Y Y, Zhu P, et al. Geothermal resource characteristics of Yueliangwan in Binhai Uplift of North Jiangsu Basin[J]. Journal of Geology, 2021, 45(1): 69-74.
- [7] 汤井田, 何继善. 可控源音频大地电磁法及其应用[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2005.
- Tang J T, He J S. Controllable source audio frequency magnetotelluric method and its application [M]. Changsha: Central South University Press, 2005.
- [8] 王军成, 黄仕茂, 徐燕燕. 可控源音频大地电磁法(CSAMT)在茅山地热资源勘查中的应用[J]. 地质学刊, 2018, 42(1): 161-166.
- Wang J C, Huang S M, Xu Y Y. The application of CSAMT in geothermal resource exploration in Mount Maoshan, Jiangsu Province [J]. Journal of Geology, 2018, 42(1): 161-166.
- [9] 王刚, 王书民, 朱威, 等. AMT 近源干扰压制方法[J]. 物探与化探, 2015, 39(2): 371-375.
- Wang G, Wang S M, Zhu W, et al. Method of suppressing the adjacent source interference in AMT[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2015, 39(2): 371-375.
- [10] 赵晓鸣, 张恩力, 米晓利, 等. CSAMT 资料处理中的静校正问题[J]. 工程地球物理学报, 2008, 5(3): 311-314.
- Zhao X M, Zhang E L, Mi X L, et al. Static correction of CSAMT data[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2008, 5(3): 311-314.
- [11] 栾晓东, 底青云, 雷达. 基于牛顿迭代法和遗传算法的 CSAMT 近场校正[J]. 地球物理学报, 2018, 61(10): 4148-4159.
- Luan X D, Di Q Y, Lei D. Near-field correction of CSAMT data based on Newton iteration method and GA method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2018, 61(10): 4148-4159.
- [12] 李帝铨, 汪振兴, 胡艳芳. 广域电磁法在武陵山区页岩气勘探中的探索应用——以黔北桐梓地区为例[J]. 物探与化探, 2020, 44(5): 991-998.
- Li D Q, Wang Z X, Hu Y F. The application of WFEM to shale gas exploration in Wuling Mountain area: A case study of Tongzi area in northern Guizhou [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 991-998.
- [13] 危志峰, 陈后扬, 吴西全. 广域电磁法在宜春某地地热勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2020, 44(5): 1009-1018.
- Wei Z F, Chen H Y, Wu X Q. The application of wide field electromagnetic method to geothermal exploration in Yichun [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 1009-1018.
- [14] 孟凡洋, 包书景, 陈科, 等. 基于广域电磁法的页岩气有利区预测——以渝东北巫山地区为例[J]. 物探与化探, 2018, 42(1): 68-74.
- Meng F Y, Bao S J, Chen K, et al. The prediction of shale gas favorable area based on WFEM: A case study of Wushan area in northeast Chongqing [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(1): 68-74.
- [15] 潘佳铁, 吴庆举, 李永华, 等. 华北地区瑞雷面波相速度层析成像[J]. 地球物理学报, 2011, 54(1): 67-76.
- Pan J T, Wu Q J, Li Y H, et al. Rayleigh wave tomography of the phase velocity in north China[J]. Journal of Geophysics, 2011, 54(1): 67-76.
- [16] 刘艳秋, 徐洪苗, 胡俊杰. 综合物探方法在水库堤坝隐患探测中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(4): 546-551.
- Liu Y Q, Xu H M, Hu J J. Application of comprehensive geophysical exploration technique to detecting hidden defects of reservoir dams [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2019, 16(4): 546-551.
- [17] 徐佩芬, 李世豪, 凌甦群, 等. 利用 SPAC 法估算地壳 S 波速度结构[J]. 地球物理学报, 2013, 56(11): 3846-3854.
- Xu P F, Li S H, Ling S Q, et al. Application of SPAC method to estimate the crustal S-wave velocity structure [J]. Journal of Geophysics, 2013, 56(11): 3846-3854.
- [18] 徐佩芬, 侍文, 凌苏群, 等. 二维微动剖面探测“孤石”: 以深圳地铁 7 号线为例[J]. 地球物理学报, 2012, 55(6): 2120-2128.
- Xu P F, Shi W, Ling S Q, et al. Mapping spherically weathered "Boulders" using 2D microtremor profiling method: A case study along subway line 7 in Shenzhen [J]. Journal of Geophysics, 2012, 55(6): 2120-2128.
- [19] 张作宏, 王军成, 戴康明. CSAMT 在沿海围垦区地热勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2014, 38(4): 680-683.
- Zhang Z H, Wang J C, Dai K M. The application of CSAMT method to geothermal exploration in coastal tideland reclamation areas [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 38(4): 680-683.
- [20] 杜建国, 姚文江, 范迪富. 江苏地热资料类型及开发利用前景[J]. 地质学刊, 2012, 36(1): 86-91.
- Du J G, Yao W J, Fan D F. Types of geothermal data and its development and utilization prospects in Jiangsu Province [J]. Journal of Geology, 2012, 36(1): 86-91.
- [21] 汪名鹏, 刘彦华, 高鹤健. CSAMT 在淮安金湖森林公园景区地热勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2020, 17(1): 24-30.
- Wang M P, Liu Y H, Gao H J. Application of CSAMT to geothermal exploration in Jinhu forest park scenic area in Huai' an [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2020, 17(1): 24-30.
- [22] 陶土振. 郯庐断裂带及邻区地热场特征、温泉形成因素及气体

组成[J]. 地质勘探, 2000, 20(6): 42-47.

Tao S Z. Geothermal field characteristics of Tanlu fault zone and its

neighbouring regions, thermal spring genesis and its composition

[J]. Geologic Examination, 2000, 20(6): 42-47.

## Application of a comprehensive geophysical exploration methods in the exploration of geothermal resources in Yueliangwan, Binhai County

WANG Jun-Cheng<sup>1,4</sup>, ZHAO Zhen-Guo<sup>2</sup>, GAO Shi-Yin<sup>1,4</sup>, LUO Chuan-Gen<sup>1,4</sup>,  
LI Lin<sup>1,4</sup>, XU Ming-Zuan<sup>1,4</sup>, LI Yong<sup>3</sup>, YUAN Guo-Jing<sup>3</sup>

(1. Geological Exploration Technology Institute of Jiangsu Province, Nanjing 210049, China; 2. China Communications Construction Company Highway Consultants Co., Ltd., Beijing 100088, China; 3. Beijing Zhongke Di Yuan Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China; 4. Jiangsu Engineering Research Center for Aeronautical Earth Exploration and Intelligent Sensing, Nanjing 210049, China)

**Abstract:** This study explored the geothermal resources in Yueliangwan, Binhai County, Jiangsu Province using the controlled source audio-frequency magnetotellurics (CSAMT) method and the wide-field electromagnetic method. Through the auxiliary correction of near-field and transition-field curves, as well as the inversion based on the CSAMT data, this study obtained the electrical structure information of underground geothermal resources in the Binhai port. Meanwhile, this study acquired the information on the underground geometric structure using the microtremor exploration method. By comprehensively analyzing the interpretation results of three kinds of geophysical data, this study obtained the geothermal model of the study area and determined the locations of the anomalies. A geothermal well with a depth of 2 919 m was drilled in the study area, obtaining water yield of 2 171 m<sup>3</sup>/d with a water temperature of 51 °C. The high consistency between the results from the comprehensive geophysical exploration and the geological and geothermal well data indicates that the comprehensive geophysical exploration method can improve the reliability of geothermal exploration results.

**Key words:** exploration of geothermal resources; controlled source audio-frequency magnetotelluric method; wide-field electromagnetic method; microtremor survey; comprehensive geophysical exploration methods

( 本文编辑:王萌)