



广域电磁法在苏北盆地厚覆盖区地热勘查中的应用

崔 健^{1,2}, 邓 荻², 张海东^{1,2}, 阮 娟¹, 岑 超^{1,2}, 宋 涛^{1,2}

1. 江苏省有色金属华东地质勘查局, 江苏 南京 210007;
2. 江苏华东 814 地球物理勘查有限公司, 江苏 南京 210007;

摘 要: 为了解决强干扰地区电磁数据采集质量差和厚覆盖区目标热储层埋深大的难题, 丰富沉积盆地型地热资源勘探的技术手段, 在江苏苏北盆地厚覆盖区开展了广域电磁法地热勘查工作。经过野外资料采集和数据处理, 获得了地下 3.5 km 以浅的电性结构, 划分出 7 套电性层, 结合地层物性特征识别出 7 套地层, 查明了主要热储层的埋深及厚度, 部署了 DR1 地热井, 完井井深 2 535 m, 并于 1 634~2 535 m 钻遇三垛组一段和戴南组二段热储层, 涌水量 432 m³/d, 出水水温 63.0 °C。钻探结果表明广域电磁法在地热勘探中取得了良好的应用效果, 可为类似地区开展地热勘查工作提供参考。

关键词: 广域电磁法; 地热勘查; 厚覆盖区; 苏北盆地

APPLICATION OF WIDE FIELD ELECTROMAGNETIC METHOD IN GEOTHERMAL EXPLORATION OF THICK COVERED AREA IN NORTHERN JIANGSU BASIN

CUI Jian^{1,2}, DENG Di², ZHANG Hai-dong^{1,2}, RUAN Juan¹, CEN Chao^{1,2}, SONG Tao^{1,2}

1. Eastern China Bureau of Geology and Exploration, Jiangsu Nonferrous Metals, Nanjing 210007, China;
2. Jiangsu Eastern China No. 814 Geophysical Exploration Co., Ltd., Nanjing 210007, China

Abstract: To solve the problems of poor quality of electromagnetic data acquisition in strong interference area and large buried depth of target thermal reservoir in thick covered area, and to enrich the technical means of sedimentary basin-type geothermal resource exploration, the geothermal exploration by means of wide field electromagnetic method (WFEM) is carried out in the thick covered area of Northern Jiangsu Basin. Through field data gathering and data processing, the study obtains the electrical structure at the depth of 3.5 km below surface, delineates 7 sets of electrical layers, identifies 7 sets of strata based on the physical characteristics, and ascertains the burial depth and thickness of major thermal reservoirs. The DR1 geothermal well is deployed with a completion depth of 2535 m. The thermal reservoirs from the first member of Sanduo Formation and the second member of Dainan Formation are drilled at 1634-2535 m, with the water inflow of 432 m³/d and water temperature of 63.0 °C. The drilling results show that WFEM has achieved good results in geothermal exploration and can provide reference for geothermal exploration in similar areas.

Key words: wide field electromagnetic method; geothermal exploration; thick covered area; Northern Jiangsu Basin

0 前言

地热资源作为一种绿色、可持续再生的清洁能源,

因其具有分布范围广、资源量巨大等特点, 一直以来, 受到全世界的广泛关注^[1-3]。同时, 地热资源的开发利

收稿日期: 2021-11-15; 修回日期: 2022-01-04. 编辑: 李兰英.

基金项目: 江苏省有色金属华东地质勘查局基础研究专项资金项目“基于地球物理数据的地下水源识别软件系统研发”(HDYS-KY 2020-02); 江苏省地质学会 2021 年重点学术研究课题和学术交流方向项目“江苏省页岩气的勘探方向与关键地球物理勘探技术研究”(苏地会[2021]30 号).

作者简介: 崔健(1984—), 男, 蒙古族, 硕士, 高级工程师, 主要从事地球物理勘探理论研究和电磁法数据正反演工作, 通信地址 江苏省南京市秦淮区石门坎 102 号, E-mail://ece_cuijian@qq.com

用对实现“碳达峰、碳中和”目标、调整能源产业结构、实现清洁低碳发展都具有十分重要的意义^[3-4]。经过多年的勘探开发,浅层地热资源已经勘查完毕,深层地热能受到储层埋深大、地表条件复杂、传统勘探手段难以发挥作用的制约,一直影响着勘查的效率。

地球物理方法具有无损、高效、成本低等优势,在地热资源勘查中扮演着越来越重要的角色,其中基于电性参数的勘探手段应用最为广泛。随着地下温度的升高,储层的电阻率会发生很大的变化,与围岩形成较为明显的电性差异,这就为通过电性参数研究地热资源的分布提供了重要的前提条件^[4]。电法勘探可以查明与地下热水有关的断裂构造信息,圈定热水储层的分布范围,确定盖层的厚度等,是最直接、最有效的勘探手段^[5]。常用的方法包括直流电测深法、时间域激发极化法、瞬变电磁法、可控源音频大地电磁测深法、大地电磁测深法等^[6-9]。直流电测深法和时间域激发极化法,在早期浅层地热勘探工作中发挥了重要的作用,通过对施加直流电作用下地下传导电流的分布规律,以及不同深度极化率、半衰时、衰减度等参数的研究,可以有效地查明浅层地下水的分布情况^[10-13];瞬变电磁法是利用接地线源或不接地线圈,向地下发射电磁脉冲,并在断电的瞬间接收由一次场引起的感应二次场信号,对研究地下低阻体的分布效果较好^[14-15];可控源音频大地电磁测深法和大地电磁测深法都属于频率域电磁法范畴,以人工或天然电磁场信号作为场源,在地面观测电场信号和磁场信号,根据频率的高低来获取地下不同深度的电性分布情况^[16-22]。以上方法在地热资源勘探中都发挥了重要的作用,也积累了大量的成功案例,但这些方法也有一定的局限性。直流电测深法和时间域激发极化法仅适用于浅层勘探,且施工效率偏低,直流供电的电流小,抗干扰能力差;瞬变电磁法所接收的感应二次场信号弱,受关断时间的影响,浅部盲区较大;大地电磁测深法是利用天然场信号,在城镇周边等电磁干扰较严重的地区难以发挥作用;可控源音频大地电磁测深法在施工时需要电磁场满足远区的要求,收发距要达到探测深度的3~6倍,使得该方法的有效观测范围受到很大程度的限制,并且在计算卡尼亚视电阻率时,要求较为准确的电场与磁场信息,因此在强干扰地区,当磁场信号波动较大时,卡尼亚视电阻率计算结果误差偏大,也直接影响

了反演结果的精度和可靠性^[23-24]。

近年来快速发展起来的广域电磁法,是由何继善院士相对于传统可控源音频大地电磁法(CSAMT)和磁偶源频率测深法(MELOS)提出来的^[25]。该方法摒弃了CSAMT方法远区信号微弱的劣势,扩展了观测范围,也摒弃了MELOS方法的校正方法,保留了计算公式中的高次项,既不是沿用卡尼亚视电阻率计算公式,也不是把非远区校正到远区,而是用适合全域的公式计算电阻率,拓展了人工源电磁法的测量范围,加大了勘探深度^[24, 26-27]。E-E_x装置只测量电信号,在一定程度上提高了方法的抗干扰性。经过这些年的应用实践,如曹彦荣等^[26]、李麒麟等^[28]在深层地热勘探,朱云起等^[29]在共和盆地干热岩勘探,曾何胜等^[30]在电磁强干扰环境下的城市地热勘探,田红军等^[31]在扬子准地台黔北台隆区地热勘探,危志峰等^[32]在宜春某地对流型地热水资源勘探中,广域电磁法均取得了较好的应用效果。本文以江苏苏北盆地的沉积盆地型地热资源勘查和钻探验证成果为例,探讨广域电磁法在盆地厚覆盖区的勘探效果。

1 研究区地质与地球物理特征

1.1 地质特征

研究区位于江苏省扬州市东北部,勘探面积约6 km²,人文干扰大。构造位置属苏北盆地高邮凹陷,地表为第四系覆盖,下伏古近系和新近系地层,厚度巨大,从老到新分别为古近系古新统泰州组(E_{1t})和阜宁组(E_{1f})、始新统戴南组(E_{2d})和始新统-渐新统三垛组(E_{2-3s})、新近系盐城组(N_{1-2y})等陆相碎屑岩^[33]。无大规模岩浆岩发育(图1)。

1.2 地热地质特征

高邮凹陷的三垛组一段(E_{2-3s}¹)下部和戴南组二段(E_{2d}²)上部的陆相碎屑岩类砂岩为最佳热储层。其主要热储特征是:埋深大于1 800 m,砂岩厚度50~100 m,岩石孔隙度一般在16%~32.4%之间,平均孔隙度为20.4%,平均渗透率186.4×10⁻³ μm²。物性有向下变差的趋势。

在高邮凹陷深凹带内,E_{2-3s}¹下部和E_{2d}²上部地温梯度值相近,为2.72~2.91 °C/hm。研究区所处的苏北盆地地表大地热流值为65.5~76.0 mW/m²^[34],为中度值,其中地幔热流占76%,地表内放射性物质生热占24%。

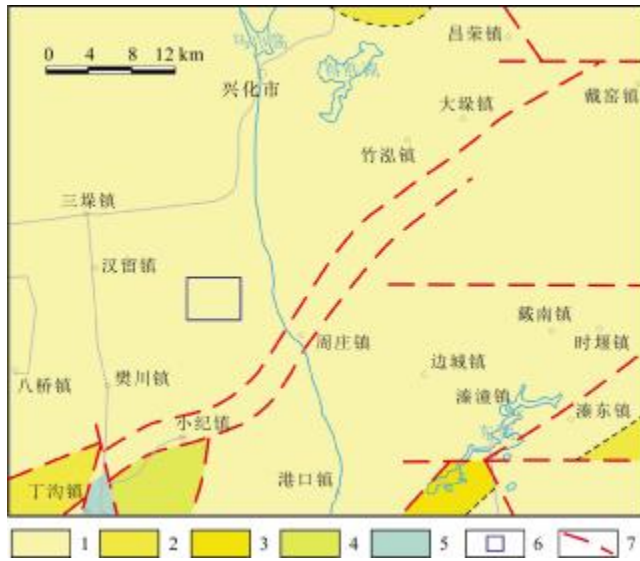


图1 研究区基岩地质图

Fig. 1 Geological map of bedrocks in the study area

1—三垛组(Sanduo fm.); 2—阜宁组(Funing fm.); 3—泰州组(Taizhou fm.); 4—浦口组(Pukou fm.); 5—侏罗系(Jurassic); 6—研究区范围(study area); 7—断层(fault)

E_{2-3s^1} 下部热储层中水质组分分析结果显示, Cl⁻含量为 7 157~15 208 mg/L, 总矿化度为 16 306~28 254 mg/L, 水化学类型有 Na₂SO₄、NaHCO₃ 型。

E_2d^2 上部热储层中水质组分分析结果显示, Cl⁻含量为 5 382~15 034 mg/L, 总矿化度为 8 574~28 857 mg/L, 水化学类型有 NaHCO₃、Na₂SO₄ 型。

据真 3、真 158 井地温测试, E_{2-3s^1} 下部热储层中实测地温为 81 °C, 井口水温 64~74 °C, 正常生产时井筒热损 7 °C。 E_{2-3s^1} 下部单试和 E_{2-3s^1} 下部+ E_2d^2 上部合试全层位产水量可达 1 000 m³/d 以上。

1.3 地球物理特征

苏北盆地地表第四系覆盖层较厚, 研究区周边无露头出露。通过在附近的一口钻井 ZK1 布置广域电磁测点, 进行井旁测深反演, 经数据统计分析, 获得了地层的电性参数特征, 如表 1 所示。其中热储层 E_{2-3s^1} 和 E_2d^2 以砂岩为主, 孔隙较为发育, 在富水情况下表现为低阻和中阻的特征, 同时, 随着水的矿化度增高, 地层的电阻率呈线性减小, 与上部地层盐城组(中阻)和下部伏地层戴南组(中高阻)有明显的电性差异, 这为应用电法探寻热储层奠定了基础。

2 数据采集与处理

2.1 数据采集

经前期现场勘查, 研究区内各类干扰源具有分布广、类型多、强度大的特点, 因此选用广域电磁法开展工作。野外工作布置如图 2 所示, 广域电磁法测线共 4 条, 点距 50 m, 总长度 10 km, 共计 205 个测点。同时, 为了更好地对物探成果进行解译, 延长测线 Y2 到钻井 ZK1 处, 布设连井的物探剖面起到标定的作用。

本研究广域电磁法施工, 采用 E-E_x 工作模式, 供

表 1 研究区地层及电性分层

Table 1 Lithological and electrical stratification in study area

地层	特征描述	电阻率/Ωm	电性特征
东台组	Qd 土黄、灰黄色砂质黏土与黄灰色沙砾层互层	8-21	低阻层
盐城组	N ₁₋₂ 下段为浅棕红、灰绿色粉砂质泥岩与灰白、灰黄色中粗砂岩、砾状砂岩、细砾岩互层, 上段为浅灰黄、浅灰色砂砾层与浅棕色黏土层, 组成 3-4 个正旋回	3.9-41	中阻层 (高低变化)
三垛组	E_{2-3s^2} 浅棕、浅灰黄色粉—细砂岩, 含砾砂岩夹棕红色泥岩	11	低阻层
	E_{2-3s^1} 中上部棕红色泥岩夹浅棕、浅灰色砂岩, 下部棕色块状砂岩、含砾砂岩, 分 7 个砂层组, 均有油层	24	
戴南组	E_2d^2 褐色泥岩与浅棕、灰色粉砂岩、细砂岩呈不等厚互层, 分 5 个砂层组, 有油气显示	44	中阻层
	E_2d^1 灰紫、灰黑色泥岩与灰色薄层粉细砂岩互层, 分 3 个砂层组, 均有油层	67	中高阻层
阜宁组	E _f 分四段: 一段为深灰、暗棕色泥岩与浅棕、灰色粉、细砂岩互层; 二段为灰黑色泥岩、灰质泥岩夹薄层泥灰岩等; 三段为灰黑色泥岩、灰质泥岩夹薄层灰质粉砂岩等; 四段为灰黑色泥岩、页岩夹薄层浅灰色泥灰岩等	105	高阻层
泰州组	E _t 下部灰白色块状砂岩、砾岩夹深灰、暗棕色泥岩, 上部灰黑色泥岩夹薄层泥灰岩		

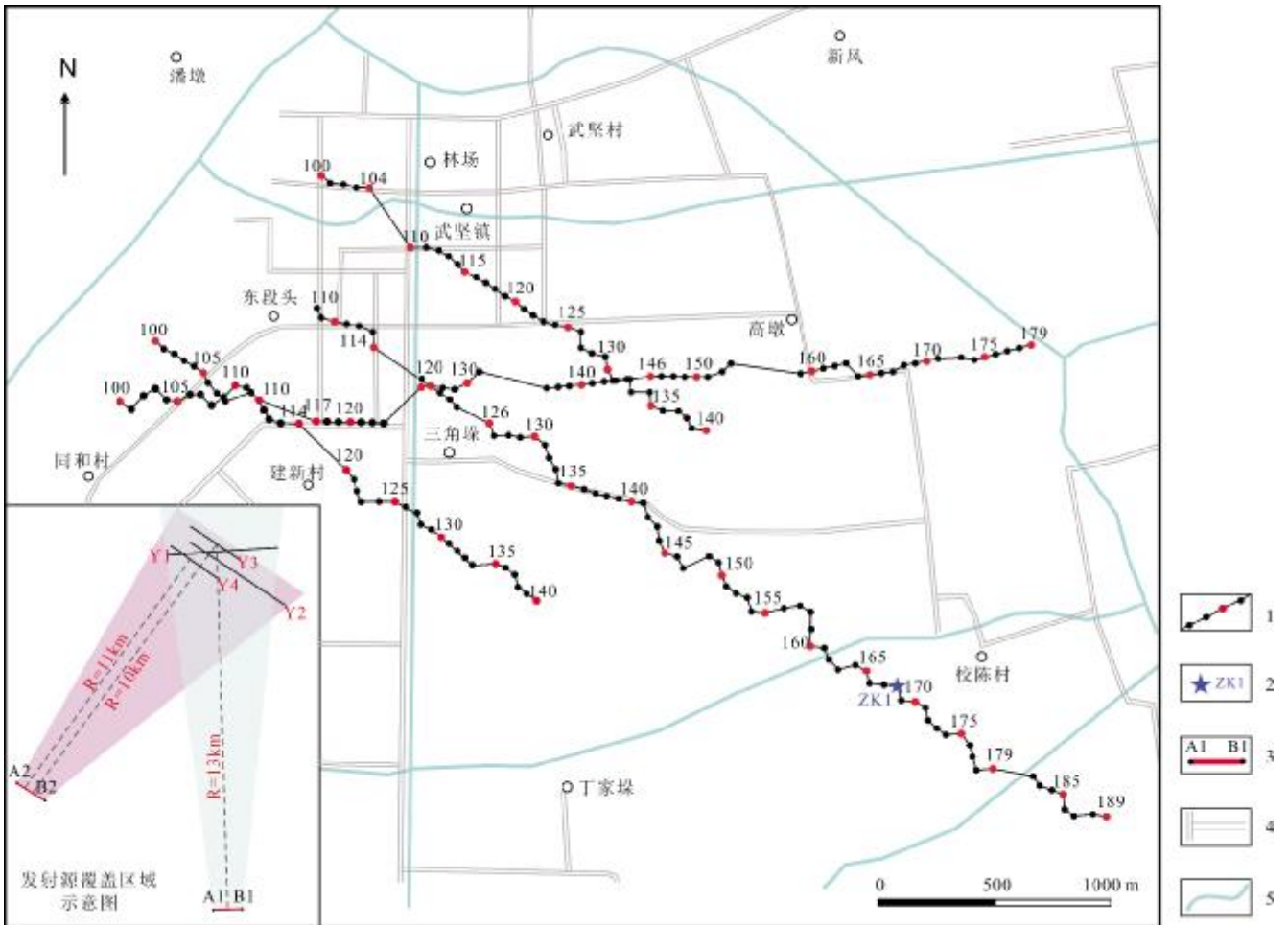


图 2 野外工作布置图

Fig. 2 Layout map of field work

1—广域电磁测线及测点(WFEM survey line and point); 2—已知钻孔(existed borehole); 3—广域电磁发射源(WFEM emission source); 4—道路 (road); 5—河流(river)

电方式为偶极供电, 测量水平电场分量 E_x . 经理论计算和野外现场试验结果, 最终确定供电电极距长度为 1 km, 收发距为 10~13 km, 其中发射源 A1-B1 控制 Y1 线, 发射源 A2-B2 控制 Y2、Y3、Y4 线. 工作频率选取 11 频组、9 频组、7 频组、5 频组、3 频组和 1 频组, 频率范围为 0.0117~8192 Hz, 频点数为 40 个. 发射端采用大功率发电机, 最大供电电流为 110 A. 经仪器自带的处理软件(JSGY-2)计算, 得到了单点的频率-广域电阻率曲线(图 3).

2.2 数据处理

文中的数据处理采用 GMES_3DI 重磁电震三维反演成像解释一体化系统中的 WFEM 模块, 应用带地形的非线性共轭梯度法反演, 通过调节正则化参数来控制反演结果的光滑程度和分辨率, 并结合区域地质

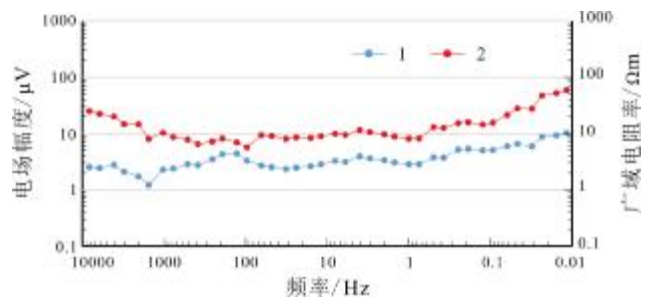


图 3 单点电场、广域电阻率曲线

Fig. 3 Electric field and wide field resistivity curves

of single point

1—电场(electric field); 2—广域电阻率(wide field resistivity)

资料和电性资料, 最终建立研究区的地电模型. 处理过程主要包括频点编辑、滤波去噪、定性分析等, 并在此基础上, 开展一维或二维连续介质反演, 得到电阻率

断面图. 在反演过程中, 多次反复, 逐渐修正模型, 减少反演拟合误差. 图 4 为二维连续介质反演结果的三维视图.

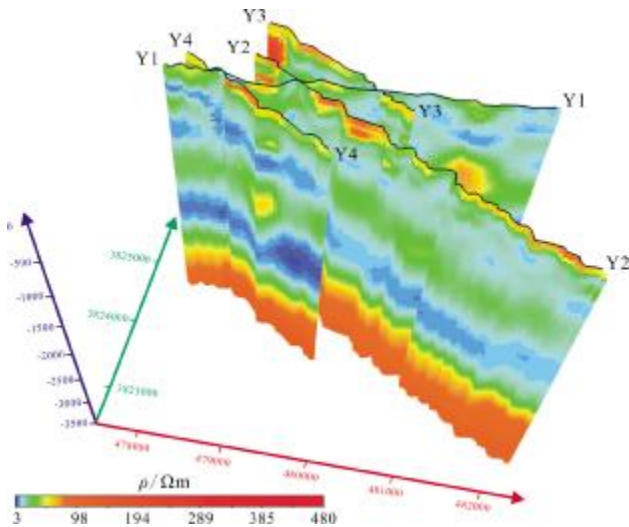


图 4 广域电磁法二维反演断面的三维视图

Fig. 4 3D representation of 2D inversion section by WFEM

3 成果推断解释

广域电磁剖面成果的综合地质解释按照“从已知到未知”的原则, 结合地层的电性参数特征, 在二维反演剖面上划分地层.

首先开展经过已知钻井 ZK1 的广域电磁 Y2 线的解释工作, 根据已知钻井分层情况划分广域电磁剖面上地层展布.

从二维连续介质反演结果的三维展示图看, 研究区各剖面交叉处电性结构基本一致. 因此, 将 Y2 线解释成果作为标定剖面, 各剖面交叉处地层分层深度一致, 做到整体解释成果闭合, 完成其他各剖面的综合解释工作.

3.1 过已知钻井剖面解释

Y2 线 168 点附近为已知钻井 ZK1, 其钻探成果划分地层与 Y2 线电性结构吻合. ZK1 成果显示: 地表至 -3 500 m 可划分为 Qd 、 N_{1-2y} 、 E_{2-3s^2} 、 E_{2-3s^1} 、 E_2d^2 、 E_2d^1 、 E_f 七套地层, 对照地层的电性参数特征, Qd 为低阻层, N_{1-2y} 为中阻层(高低变化), E_{2-3s^2} 、 E_{2-3s^1} 为低阻层, E_2d^2 为中阻层, E_2d^1 为中高阻层、 E_f 为高阻层. ZK1 地层界线深度与 Y2 线反演剖面不同电性层分层深度基本吻合(图 5).

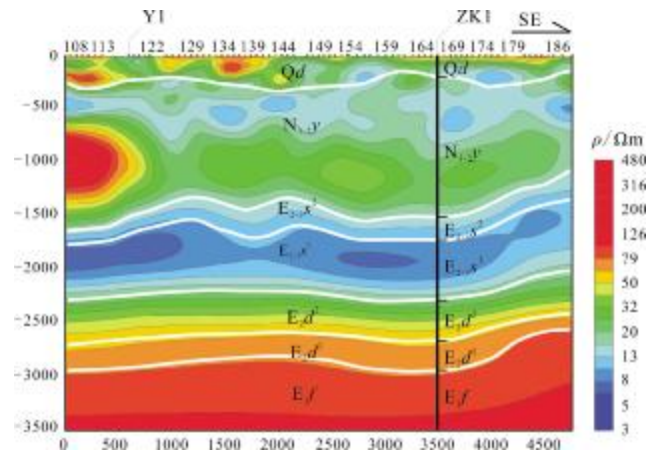


图 5 Y2 线物探勘查成果图

Fig. 5 Geophysical exploration result for survey line Y2

Y2 线的整体电性结构与 ZK1 处电性特征基本一致, 据此可解释: Y2 线, 表层 0~ -200 m, 低阻层, 整体呈水平层状, 局部有高阻团块, 推测为第四系东台组 (Qd) 砂质黏土与沙砾层; -200 m 至 -1 200~ -1 600 m 左右, 中阻层(高一低变化), 推测为新近系盐城组 (N_{1-2y}), 其上部为砂砾层与黏土层, 下部为砂质泥岩与砾状砂岩、细砾岩; 中部 -1 200~ -1 600 m 至约 -1 900~ -2 300 m 低阻层, 推测为古近系三垛组 (E_{2-3s}) 砂岩、粉细砂岩与泥岩; 深部 -1 900~ -2 300 m 至 -2 500~ -3 000 m 中阻、中高阻, 推测为古近系戴南组 (E_2d) 粉细砂岩与泥岩互层; 深部 -2 700 m 以深为高阻层, 推测为古近系阜宁组 (E_f) (图 5).

3.2 其他剖面解释

Y1 线与 Y2 线相交, 交点处以 Y2 线解释成果为准, 划分 Y1 线地层展布, 自地表至深部为 Qd 、 N_{1-2y} 、 E_{2-3s^2} 、 E_{2-3s^1} 、 E_2d^2 、 E_2d^1 、 E_f 七套地层(图 6). Y3、Y4 线与 Y1 线相交, 交点处以 Y1 线解释成果为准, 同样自地表至深部划分七套地层(图 7). 4 条广域电磁剖面地层解释成果与电性结构吻合, 各剖面交点处地层界线深度一致, 解释成果闭合, 客观反映了工作区地层展布特征.

4 地热井钻探

为验证广域电磁成果, 在 Y2 线与 Y1 线交叉处 (Y2 线 120 点、Y1 线 126 点) 部署 DR1 井, 目标层为三垛组一段下部和戴南组二段上部热储层.

DR1 完钻井深 2 535 m, 揭露最老地层为戴南组

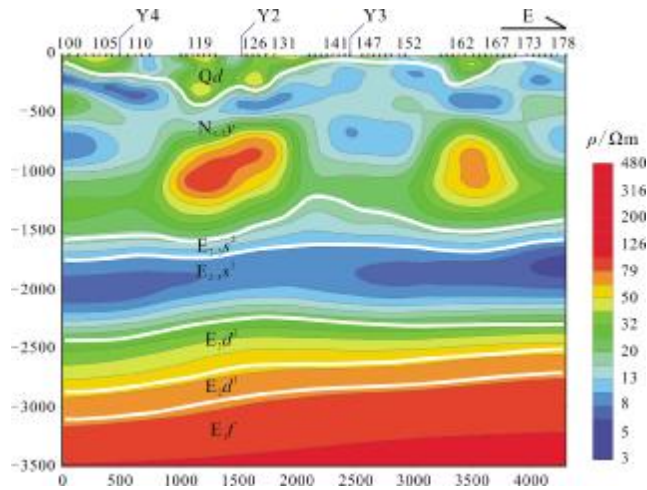


图 6 Y1 线物探勘查成果图

Fig. 6 Geophysical exploration result for survey line Y1

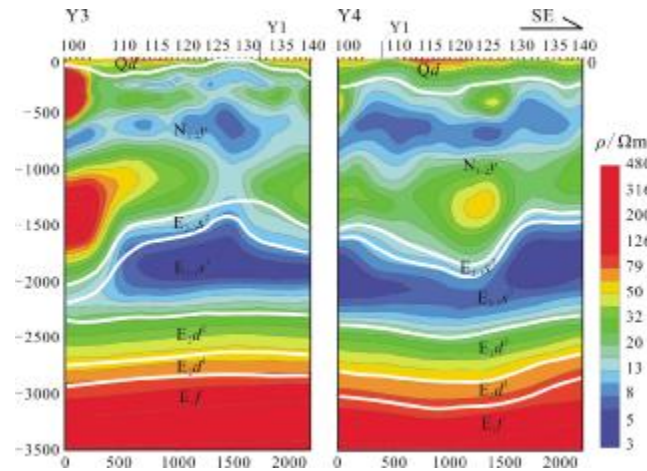


图 7 Y3、Y4 线物探勘查成果图

Fig. 7 Geophysical exploration result for survey lines Y3 and Y4

二段上部(图 8), 钻获地热水, 涌水量为 432 m³/d, 出水水温 63.0 ℃, 水化学类型为 Cl-Na 型, 为碘水、锶水、铁水、硼水、硅水, 为理疗热矿泉水资源, 具备较高的理疗价值. 利用广域电磁法在苏北盆地厚覆盖区发现了优质地热水资源.

5 结论

在江苏苏北盆地厚覆盖区, 利用广域电磁法资料, 采用先进的反演算法, 在地热资源勘探中取得了较好的效果, 并得出以下几点结论:

(1)从广域电磁法的原理分析, 该方法只测量电场数据来计算广域视电阻率, 不测量易受干扰的磁场数

据, 与其他方法相比, 在很大程度上提高了在人文干扰严重地区电磁法数据采集的质量, 为后期资料反演和解释奠定了基础.

(2)从广域电磁法的结果分析, 采用先进的反演算法获得的成果剖面可以清晰地反映地下 3.5 km 以浅的电性结构, 与已知钻孔划分的地层的电性参数特征吻合, 增强了反演结果的可靠性.

(3)从钻探验证结果分析, 依据广域电磁法剖面的解释成果部署的 DR1 井揭露了深部的热储层, 钻获优质地热水资源, 证明了广域电磁法在盆地厚覆盖区大深度勘探中的有效性.

(4)综上所述, 广域电磁法具有抗干扰能力强、勘探深度大、反演结果精度高等突出优点, 是一种高效的地热资源勘探技术手段, 具有广阔的应用前景, 值得大力推广.

参考文献(Reference):

[1] 庞忠和, 汪集暘. 地热能迎空前发展机遇[N]. 中国科学报, 2021-01-05(03).
 Pang Z H, Wang J Y. Geothermal energy meets unprecedented development opportunities[N]. Chinese Journal of Science, 2021-01-05(03). (in Chinese)

[2] 汪集暘. 地热清洁取暖大有可为[N]. 中国科学报, 2020-09-02(03).
 Wang J Y. Geothermal clean heating is promising[N]. Chinese Journal of Science, 2020-09-02(03). (in Chinese)

[3] 陈昌昕, 严加永, 周文月, 等. 地热地球物理勘探现状与展望[J]. 地球物理学进展, 2020, 35(4): 1223-1231, doi: 10.6038/pg2020DD0229.
 Chen C X, Yan J Y, Zhou W Y, et al. Status and prospects of geophysical method used in geothermal exploration [J]. Progress in Geophysics, 2020, 35(4): 1223-1231, doi: 10.6038/pg2020DD0229.

[4] 曾昭发, 陈雄, 李静, 等. 地热地球物理勘探新进展[J]. 地球物理学进展, 2012, 27(1): 168-178, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.01.019.
 Zeng Z F, Chen X, Li J, et al. Advancement of geothermal geophysics exploration[J]. Progress in Geophysics, 2012, 27(1): 168-178, doi: 10.6038/j.issn.1004-2903.2012.01.019.

[5] 丁雷, 宋绍军, 关键, 等. 地热资源勘探方法技术的应用与展望[J]. 吉林地质, 2004, 24(4): 113-117.
 Ding L, Song S J, Guan J, et al. An application of exploration techniques to geothermal resources and its prospect[J]. Jilin Geology, 2004, 24(4): 113-117.

[6] 刁天仁, 杜霏. 综合物探方法在安徽省岳西县溪沸地热勘探中的应

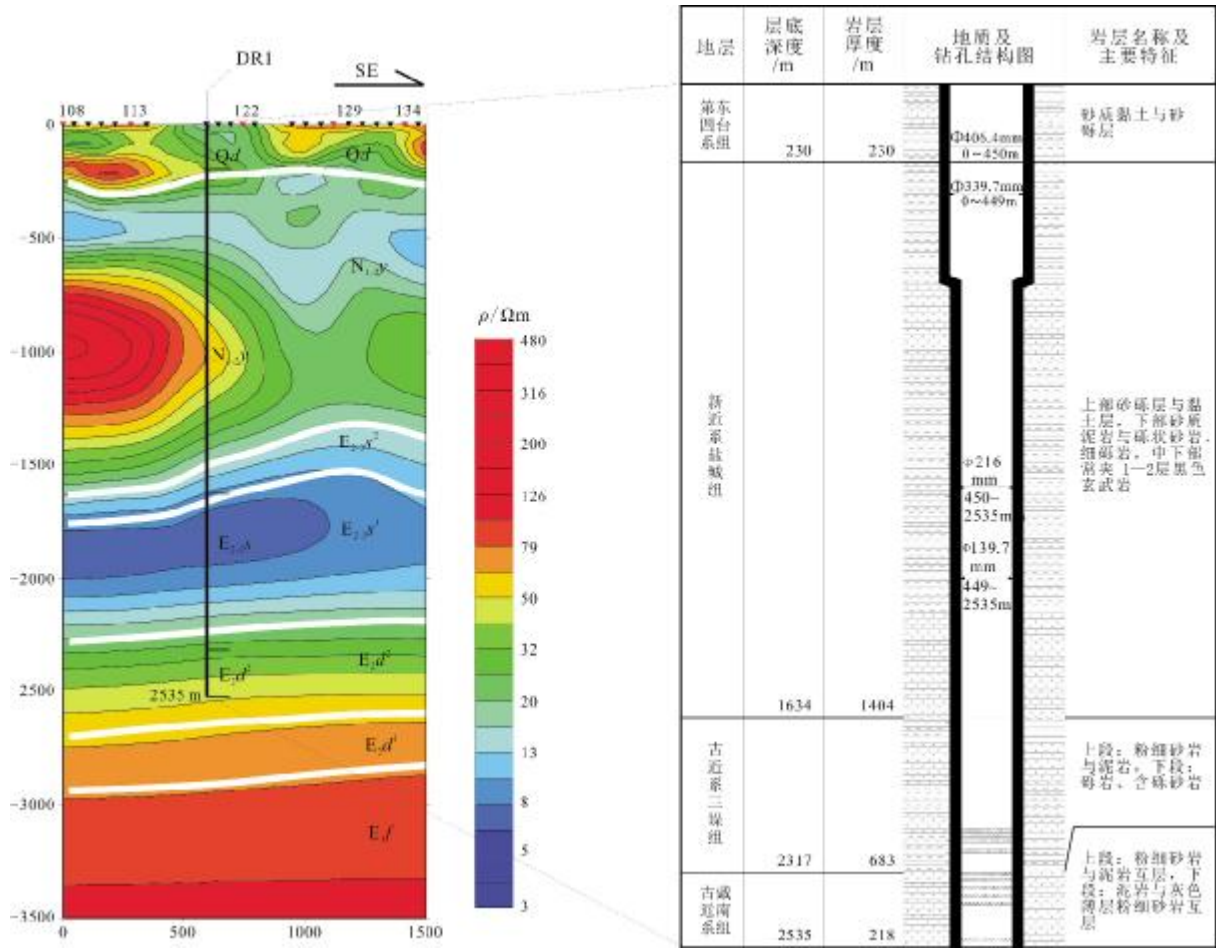


图8 DR1井钻探结果与Y2线物探勘查成果对比图

Fig. 8 Comparison between drilling result of well DR1 and geophysical exploration result of survey line Y2

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.

[7]贾立国, 张帆, 蔡贺, 等. 综合物探方法在水文地质勘查中的应用——以东宁市浙江工业园勘查为例[J]. 地质与资源, 2017, 26(5): 515-520.

Jia L G, Zhang F, Cai H, et al. Application of comprehensive geophysical methods in hydrogeological exploration: A case study of Zhejiang Industrial Park in Dongning City[J]. Geology and Resources, 2017, 26(5): 515-520.

[8]赵宝峰, 汪启年, 陈同刚. 地球物理方法在带状热储地热资源调查中的应用——以湖南省汝城县热水镇朱屋区为例[J]. 物探化探计算技术, 2019, 41(6): 806-812.

Zhao B F, Wang Q N, Chen T G. The application of geophysical methods in the investigation of geothermal resources with banded reservoir: Taking an example of Zhuwu favorable area, in Hot Water

Town, Rucheng County, Hunan Province[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 41(6): 806-812.

[9]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.

[10]苏永军, 马震, 孟利山, 等. 高密度电阻率法和激发极化法在抗旱找水定井位中的应用[J]. 现代地质, 2015, 29(2): 265-271.

Su Y J, Ma Z, Meng L S, et al. Application of high-density resistivity method and induced polarization method to determine a good well location in groundwater prospecting[J]. Geoscience, 2015, 29(2): 265-271.

[11]段青梅, 龙文华, 王兵, 等. 内蒙古桌子山地区岩溶水特征及勘查方法[J]. 地质与资源, 2006, 15(1): 53-56, 10.

Duan Q M, Long W H, Wang B, et al. Groundwater in Zhuozishan area, Inner Mongolia[J]. Geology and Resources, 2006, 15(1): 53-56, 10.

- [12] 焦彦杰, 吴文贤, 杨剑, 等. 云南岩溶石山区物探找水方法与实例分析[J]. 中国地质, 2011, 38(3): 770-778.
Jiao Y J, Wu W X, Yang J, et al. Geophysical water exploration methods in stone mountain karst areas and case analysis[J]. *Geology in China*, 2011, 38(3): 770-778.
- [13] 凌丹丹, 薛胜利, 周少伟. 激电测深在城市浅层地下水调查评价中的应用[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(5): 2079-2086, doi: 10.6038/pg2019CC0269.
Ling D D, Xue S L, Zhou S W. Application of induced polarization sounding method to exploration shallow groundwater in the city[J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(5): 2079-2086, doi: 10.6038/pg2019CC0269.
- [14] 张保祥, 刘春华. 瞬变电磁法在地下水勘查中的应用综述[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(3): 537-542.
Zhang B X, Liu C H. Summarization on applications to groundwater exploration by using transient electromagnetic methods[J]. *Progress in Geophysics*, 2004, 19(3): 537-542.
- [15] 彭海辉, 张湖源, 欧元超, 等. 瞬变电磁与高密度电法在岩溶区探测中的应用[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2020, 40(6): 75-81.
Peng H H, Zhang H Y, Ou Y C, et al. Application of transient electromagnetic and high density electrical methods in subsidence area detection [J]. *Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science)*, 2020, 40(6): 75-81.
- [16] 周西西. CSAMT在辽宁省北镇市某深部地热勘探中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(6): 872-877.
Zhou X X. Application of CSAMT to deep geothermal exploration in Beizhen of Liaoning Province [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2019, 16(6): 872-877.
- [17] 王恒, 甘凤伟, 卫晓锋, 等. 基于可控源音频大地电磁的传导型地热资源特征分析[J]. 矿产勘查, 2019, 10(8): 1974-1978.
Wang H, Gan F W, Wei X F, et al. The analytical of conductive geothermal resources in south of Chengde [J]. *Mineral Exploration*, 2019, 10(8): 1974-1978.
- [18] 付光明, 黄进调, 刘阳, 等. 高密度电阻率法与CSAMT法在江西会昌县坝背地热勘查中的综合探测[J]. 中国地质, 2019, 46(4): 927-936.
Fu G M, Huang J T, Liu Y, et al. Multi-electrode resistivity method and CSAMT method in geothermal exploration of Babei area in Huichang County, Jiangxi Province [J]. *Geology in China*, 2019, 46(4): 927-936.
- [19] 皮伟, 邓国成, 吴侠. 地球物理方法在武川盆地地热勘查中的应用[J]. 矿产勘查, 2019, 10(8): 2015-2022.
Pi W, Deng G C, Wu X. Application of geophysical methods in geothermal exploration in Wuchuan Basin [J]. *Mineral Exploration*, 2019, 10(8): 2015-2022.
- [20] 宋洪伟, 夏凡, 尚铭森. MT法在河北献县地区地热勘查中的应用[J]. 地质与资源, 2018, 27(3): 284-287.
Song H W, Xia F, Shang M S. Application of MT method in geothermal prospecting in Xianxian area, Hebei Province [J]. *Geology and Resources*, 2018, 27(3): 284-287.
- [21] 周超, 王光杰, 李红领, 等. 花岗岩地区深部地热构造电磁法探测研究——以福建龙海地区为例[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(3): 1153-1158, doi: 10.6038/pg2019AA0178.
Zhou C, Wang G J, Li H L, et al. Magnetotelluric method study in prospecting the deep geothermal structure in granite area: A case study of the Longhai area, Fujian [J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(3): 1153-1158, doi: 10.6038/pg2019AA0178.
- [22] 严小丽, 康慧敏, 王光杰, 等. AMT方法在鳌山卫花岗岩地区深部地热构造勘探中的应用[J]. 地球物理学进展, 2019, 34(5): 1945-1953, doi: 10.6038/pg2019CC0083.
Yan X L, Kang H M, Wang G J, et al. Application of AMT in deep geothermal structure exploration in Aoshanwei granite area of Qingdao [J]. *Progress in Geophysics*, 2019, 34(5): 1945-1953, doi: 10.6038/pg2019CC0083.
- [23] 李煜, 肖晓, 汤井田, 等. 广域电磁法与CSAMT在岩溶区探测效果对比分析[J]. 中国科技信息, 2020(12): 74-79.
Li Y, Xiao X, Tang J T, et al. Comparison and analysis of wide area electromagnetic method and CSAMT detection effect in karst area [J]. *China Science and Technology Information*, 2020(12): 74-79. (in Chinese)
- [24] 李帝铨, 胡艳芳. 强干扰矿区中广域电磁法与CSAMT探测效果对比[J]. 物探与化探, 2015, 39(5): 967-972, doi: 10.11720/wtyht.2015.5.15.
Li D Q, Hu Y F. A comparison of wide field electromagnetic method with CSAMT method in strong interferential mining area [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2015, 39(5): 967-972, doi: 10.11720/wtyht.2015.5.15.
- [25] 何继善. 广域电磁法和伪随机信号电法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
He J S. Wide field electromagnetic method and pseudo random signal electrical method [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010. (in Chinese)
- [26] 曹彦荣, 宋涛, 韩红庆, 等. 用广域电磁法勘查深层地热资源[J]. 物探与化探, 2017, 41(4): 678-683, doi: 10.11720/wtyht.2017.4.14.
Cao Y R, Song T, Han H Q, et al. Exploration of deep geothermal energy resources with wide field electromagnetic method [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2017, 41(4): 678-683, doi: 10.11720/wtyht.2017.4.14.
- [27] 何委徽, 崔健, 刘和花, 等. 江苏页岩气资源调查地球物理方法技术集成[J]. 地质学刊, 2019, 43(3): 349-358.
He W H, Cui J, Liu H H, et al. Research of integrated geophysical methods in the investigation of shale gas resources in Jiangsu Province

- [J]. *Journal of Geology*, 2019, 43(3): 349–358.
- [28]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, doi: 10.11720/wtyht.2020.0191.
- 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, doi: 10.11720/wtyht.2020.0191.
- [29]朱云起, 李帝铨, 胡艳芳, 等. 共和盆地恰卜恰地区广域电磁法勘查[C]// 2020 年中国地球科学联合学术年会论文集(十五). 重庆: 北京伯通电子出版社, 2020.
- Zhu Q Y, Li D Q, Hu Y F, et al. Wide field electromagnetic exploration of the Qiabuqia geothermal area in Gonghe Basin [C]// 2020 Chinese Earth Science Joint Academic Essays (15). Chongqing: Beijing Botong Electronic Publishing House, 2020. (in Chinese)
- [30]曾何胜, 徐元璋, 刘磊, 等. 广域电磁法在复杂电磁干扰环境的应用研究——以某市周边地热勘查为例[J]. *物探与化探*, 2020, 44(5): 1031–1038, doi: 10.11720/wtyht.2020.0228.
- Zeng H S, Xu Y Z, Liu L, et al. Researches on the application of wide field electromagnetic method to the complex electromagnetic interference environment: Exemplified by the geothermal exploration around a city [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(5): 1031–1038, doi: 10.11720/wtyht.2020.0228.
- [31]田红军, 张光大, 刘光迪, 等. 黔北台隆区地热勘探中广域电磁法的应用效果[J]. *物探与化探*, 2020, 44(5): 1093–1097, doi: 10.11720/wtyht.2020.0199.
- Tian H J, Zhang G D, Liu G D, et al. The application effect of the wide field electromagnetic method in geothermal exploration of Tailong area, northern Guizhou Province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(5): 1093–1097, doi: 10.11720/wtyht.2020.0199.
- [32]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, doi: 10.11720/wtyht.2020.0216.
- 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, doi: 10.11720/wtyht.2020.0216.
- [33]徐学思. 江苏省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.
- Xu X S. Petrostratigraphy of Jiangsu Province [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997. (in Chinese)
- [34]姜光政, 高珊, 饶松, 等. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(8): 2892–2910, doi: 10.6038/cjg20160815.
- Jiang G Z, Gao P, Rao S, et al. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition) [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(8): 2892–2910, doi: 10.6038/cjg20160815.

(上接第 13 页/Continued from Page 13)

- [67]Hao Y J, Ren Y S, Duan M X, et al. Metallogenic events and tectonic setting of the Duobaoshan ore field in Heilongjiang Province, NE China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2015, 97: 442–458.
- [68]朱群, 李之彤. 大兴安岭古利库金矿区落马湖岩群变质岩系及其含矿性[J]. *地质与资源*, 2001, 10(4): 204–209.
- Zhu Q, Li Z T. The metamorphic rocks of Luomahu Group and its ore potentiality in Guliku gold field, Daxinganling Ridge [J]. *Geology and Resources*, 2001, 10(4): 204–209.
- [69]李春诚, 吕新彪, 高荣臻, 等. 大兴安岭北段古利库金(银)矿床地质特征及成因分析[J]. *矿床地质*, 2014, 33(S1): 523–524.
- Li C C, Lv X B, Gao R Z, et al. Geological characteristics and genetic analysis of Guli Kui Gold (Ag) deposit in the northern Da Hinggan Mountains [J]. *Mineral Deposits*, 2014, 33(S1): 523–524. (in Chinese)
- [70]刘宝山, 王少轶, 牛延宏, 等. 黑龙江黑河大新屯金矿区地质特征及成因机理初探[J]. *黄金*, 2013, 34(11): 16–19.
- Liu B S, Wang S Y, Niu Y H, et al. Geological characteristics and genetic mechanism of the Daxintun gold deposit in Heihe, Heilongjiang Province [J]. *Gold*, 2013, 34(11): 16–19.
- [71]刘宝山, 李成禄. 黑河地区北宽河组地层含矿性地球化学评价——以黑河大新屯金矿矿区为例[J]. *地质调查与研究*, 2016, 39(4): 273–278.
- Liu B S, Li C L. Geochemical evaluation for ore potentiality of the Beikuanhe formation in Heihe area: A case study of the Daxintun gold deposit in Heihe [J]. *Geological Survey and Research*, 2016, 39(4): 273–278.