doi:10.11720/wtyht.2022.1608
孙海川.兰州新区西部恐龙园区块地热地质条件分析[J].物探与化探,2022,46(6):1411-1418.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1608
Sun H C. Geothermal geological conditions of the Western Dinosaur Park block in the Lanzhou New area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022,46(6):1411-1418.http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1608

兰州新区西部恐龙园区块地热地质条件分析

孙 海 川
(甘肃煤炭地质勘查院,甘肃 兰州 730000)

摘 要: 兰州新区西部恐龙园位于兰州—民和盆地,具有较好的地热勘查及开发利用前景。为进一步查清研究区热储层位和地热地质条件,在研究以往区域地质构造及地热特征的基础上,进行了可控源音频大地电磁测深和大地电磁测深勘查,据此布孔,打出了温度适宜、可供利用的地下热水。结合物探及钻探成果,推断解释了研究区的构造和岩体分布特征,对研究区地热地质条件进行了分析,并指出下一步的勘查方向。研究结果为邻区和类似地区地热勘探提供了借鉴和参考。

关键词: 地热勘查;地热地质条件;可控源音频大地电磁测深;大地电磁测深;兰州新区
中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)06-1411-08

0 引言

兰州新区位于兰州—民和盆地,地处兰州、西宁、银川3个省会城市共生带的中间位置,是甘肃省下辖的国家级新区,也是国务院确定建设的西北地区重要的经济增长极。受地域和发展基础制约,兰州新区存在生态环境脆弱、城市建设基础差、环境污染严重等诸多不利因素,城市化发展缓慢,因此,优先发展清洁能源,降低能耗比,淘汰高能耗、高污染产业,对兰州新区建设具有重要现实意义。地热是一种可再生清洁能源,实施地热资源勘查,对兰州新区产业结构决策及促进节能减排具有重要作用[1]。以往该区域上开展过的主要工作有:①1∶25万、1∶5万区域地质调查,对区内地层岩性划分、构造展布及矿产资源分布进行了较为详细的研究;②1∶20万重力、直流电测深、大地电磁测深、地震勘探以及1∶5万高精度航磁等,基本查清了坳陷内基底构造形态、盖层结构和断裂分布;③兰州—永登—皋兰地区水文地质普查(1∶20万),系统叙述了工作区的地质地貌及各类地下水水文地质条件,着重分析和评价了第四系地下水的分布、埋藏和赋存特征[2]。但上述成果因受工作目的所限,多是以论述相应工作范围的地质矿产或水文地质特征为主,对地下深部地热的成因、热储层岩性、地质构造控制条件的认识仍然停留在局部。本次在收集以往地质资料的基础上,通过实地调查,在兰州新区选择重点工作区(西部恐龙园区块)开展了地球物理勘查及钻探工作,对研究区地热资源的盖储条件、控制构造等进行综合分析,总结地热成因,提出地热资源勘查开发远景区,以期为兰州新区地热勘查提供依据。

1 地质概况

1.1 区域地质

研究区(西部恐龙园区块)地层区划属祁连地层区(Ⅴ)—中祁连地层分区(Ⅴ3)—民和盆地小区(Ⅴ34),区域上属于兰州—民和盆地,盆地位于甘肃、青海两省交界地区,属中祁连隆起带的山间断陷盆地。该盆地褶皱、断裂发育,由东北至西南依次分为皋兰隆起、永登凹陷、周家台断隆、巴州凹陷4个次级构造单元[3]。研究区主要位于永登凹陷东部。

1.2 研究区地质

研究区(西部恐龙园区块)位于兰州新区西南角,距兰州市区约50 km,行政区划分属兰州新区管辖。该区块是兰州新区重要的旅游、度假、休闲景

收稿日期: 2021-11-19; **修回日期:** 2022-10-10
基金项目: 甘肃省地质勘查基金项目“甘肃省兰州新区西南部地热资源普查”(201857)
作者简介: 孙海川(1985-),男,硕士,高级工程师,主要从事地质勘查与研究工作。Email:774617824@qq.com

点,地貌特征以洪积平原和沟谷为主,海拔 1 840~1 980 m,平均海拔 1 910 m,东西南三面为低缓黄土丘陵,南部局部为堆积梁峁丘陵,高出研究区 40~60 m。地层自下而上依次为新元古界皋兰群(Ptg)、下侏罗统炭洞沟组(J_1t)、中侏罗统窑街组(J_2y)、上侏罗统享堂组(J_3x)、下白垩统河口群(K_1h)、新近系(N)、第四系(Q)[4],其中新元古界皋兰群为变质岩。研究区主要被第四系黄土、砂砾石或新近系砂、泥岩所覆盖。

区内主要断裂有 F_1(永登断裂)、F_2(红城镇—甘露池断裂)以及 F_3 断裂等(图 1)。F_1 断裂是中祁连地块与北祁连加里东褶皱带的分界断裂,被认作是永登坳陷和皋兰隆起的分界断裂;该断裂在永登坳陷中部被 NE 向的 F_2 左行断裂切割,分为东西两段,断裂宽 3~5 km,长度超过 80 km,走向呈 NW 向。F_2 断裂位于永登凹陷北部,NE 向延伸,是永登凹陷高窑断阶带和皋兰隆起的分界断裂带,沿走向可与周家台低隆起带上的隆治—红古城断裂带相接。F_3 断裂位于研究区南部,断层走向 NE,断层性质为张扭性正断层,与 F_1 逆断层走向近于垂直,断层倾向 NW,平面延展约 31 km,断距大于 200 m[5]。

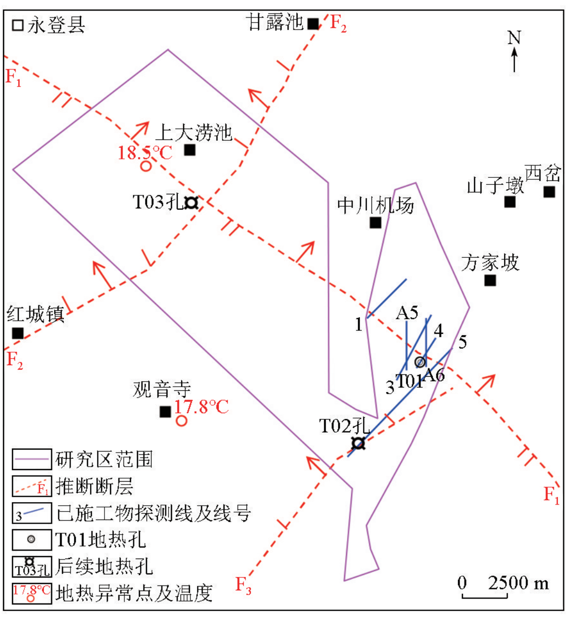

图 1 研究区地质构造概况及物探工程布置示意

Fig. 1 General situation of geological structure and layout of geophysical prospecting engineering in the study area

1.3 研究区地热地质特征

1.3.1 地热场特征

大地热流是地球内热在地壳表层最直接的显示,据地震部门观测研究,西起永登窑街,经兰州、定西至天水,存在一条明显的大地热流与地温梯度异常带(图 2)[3,6-9]。在河桥—兰州条带内,地温梯度为 2.5~3.5 ℃/100 m,大地热流值为 62~78 mW/m^2,并呈 NWW 向展布。该地温梯度高于西北地区的平均地温梯度(2.5℃/100 m)和大地热流背景值(45 mW/m^2),同时也高于我国大陆地区的平均地温梯度(3℃/100 m)和大地热流背景值(61.45 mW/m^2)。

图 2 甘青宁地区地温梯度分布

Fig. 2 Distribution map of geotemperature gradient in Gansu, Qinghai and Ningxia area

1.3.2 邻近区域地热异常

研究区附近已经发现的地热异常点(区)有 2 处,分别为永登上大涝池、观音寺地热异常孔(图 1)。两孔均为民用供水孔,位于永登拗陷东南边缘的小咸水河,邻近永登拗陷与兰州断陷交会处,两孔连线近 NS 向,相距 14 km。两孔上部地层为第四系冲积物,下部为新近系红色砂砾岩,含水层为新近系砂岩,附近地表有泉水涌出。两个孔的访问孔深约 200 m,日涌水量分别为 237 m^3/d 和 1 215 m^3/d,水温分别为 18.5 ℃ 和 17.8 ℃,高于邻区井水温度。pH 平均值为 8,矿化度平均为 1~2 g/L,水化学类型均为 Cl · SO_4–Na · Ca,分析矿化度和温度低的原因是上部有凉水混入[10]。

1.3.3 热储类型

结合区域地质资料分析,研究区热储在 F_1 断层以南大面积分布, F_1 断层以北由于断层抬升隆起,热储缺失,地热成因类型为断裂构造控制型和沉积盆地型兼有,以沉积盆地型为主,地热田兼有层状热储和断裂带状热储特征。由于断层断距大,断裂构造多次活动,构造较为复杂,初步分析地热勘查类型划为Ⅱ-3 型[11],是一个中低温对流型地热系统。

1.4 研究区地球物理特征

研究区位于民和—兰州盆地次级构造永登凹陷和皋兰隆起内,区内以往进行的地质及物探工作有限,有关物性方面资料尚缺。表 1 给出了民和—兰州盆地内地层的电阻率参数[12-13],可知新生界第四

系电阻率相对变化较大,黄土含水量不同电性上亦有差别且变化较大。新近系为区内低阻层,电阻率最低且变化稳定,往往与电性相近的古近系、白垩系、侏罗系构成统一电性层不易区分,在这一电性层内很难划分出与岩性对应的电性层。总体特征表现为新近系、古近系、白垩系、侏罗系电性差异不大,构成大套低阻层,新元古界变质岩为该区基底,基底电阻率较高,与上覆地层有明显的电性差异。

表 1 民和—兰州盆地地层电阻率特征

Table 1 Characteristics of formation resistivity in Minhe-Lanzhou basin

地层	主要岩性	电阻率/(Ω · m)
第四系	砂土、砂砾碎石	59~98
新近系	泥岩、细砂岩、砾岩	12~16
古近系	泥岩、砂岩夹石膏	3~20
	泥岩、砾岩	38~94
白垩系	粉砂岩、泥岩	5~35
	砾岩、砂砾岩	45~65
侏罗系	砾岩、砂砾岩、砂岩、泥岩	30~60
新元古界皋兰群	片岩、硅质灰岩	>100

2 地质勘查成果

2.1 工作方法

已有地质资料表明,研究区兼有断裂型带状热储和层状热储的特征,深部地热研究基本空白。物探和钻探是目前常用的地热勘查方法,其中物探的主要作用是圈定断裂带和热储层分布,是勘查地热空白区的有效手段[14]。结合本区地热地质特征及后期开发利用状况,前期工作主要在研究区西南部的西部恐龙园周边,物探工作主要围绕区域大断裂 F_1 开展,钻探依据物探成果布设在断裂内,形成“双保险”,从而保证地热孔成功率,为后续地热勘查提供依据。本次物探采用可控源音频大地电磁测深(CSAMT)、大地电磁测深(MT)2 种方法,自西北至东南共布设 4 条测线,依次命名为 1、3、4、5 线,测点编号由西南至东北依次增大;又围绕西部恐龙园布设 2 条 SN 向可控源音频大地电磁测线(A5、A6),测点编号由南至北依次增大(图 1 所示)。通过 2 种方法提供的多参数相互佐证,查明研究区断裂构造的位置、热储层的埋藏深度等,为钻探提供依据[15]。

CSAMT 是研究区的主要物探方法,该方法具有勘探深度相对较大(通常勘探深度在数十米至 3 km 之间)、有效屏蔽高阻、对低阻敏感、横向分辨率强、施工效率高等优点[16]。本次 CSAMT 测量采用加拿大产 V8 多功能电法仪,结合测区地质条件,采用赤道偶极观测装置(TM)标量测量[17],供电偶极 AB 长 1.2 km,发射角 $\theta<30°$,供电电流 13 A 以上,发射频率 960~0.17 Hz,测量点距为 100~200 m。MT 测量具有勘探深度大、不需考虑发射源问题、施工装置简便等优点[18],用于进一步确定研究区基底起伏和埋深,划分构造单元,辅助确定地热勘探孔位置。本次 MT 测量采用 V8 多功能电法仪,测点点距 600~1 000 m,频率 320~0.011 Hz,采集时间 210~240 min。记录电场水平分量 E_x、E_y(电极距 60 m)和磁场水平分量 H_x、H_y,E_x、E_y、H_x、H_y 根据“北南东西”布设[19]。

2.2 物探剖面推断解释

区内不同方向测线的反演电阻率剖面具有地电剖面形态相似和反映地质构造类似的特征。以 T01 地热孔附近的 A6、4 线及区内最长的 5 线为例(图 3、图 4),可以看出,CSAMT 反演电阻率剖面由浅部向深部依次增大,反映地层由新至老,岩性由疏松至致密。MT 反演电阻率横向上相对 CSAMT 变化较大,应是由于 MT 点距(600~1 000 m)相对于 CSAMT 点距(100~200 m)大,使得电阻率横向控制程度不高所致。由于 CSAMT 本身具有抗干能力强和横向分辨率高的优势,结合研究区特征,认为区内同一层电阻率横向变化不大[20]。

反演电阻率剖面由浅至深可划分为低阻—中低阻—高阻 3 个电性层(图 3、图 4 中的一、二、三),呈近水平层状展布略有起伏变化。结合地热孔钻遇地层情况,第一电性层为低阻电性层,电阻率值在 5~20 Ω · m,F_1 断层上盘厚度一般约 400 m,断层下盘厚度为 1 000~1 400 m,电阻率值由浅至深递增,横向上略有变化,反映了岩性差异,推断低阻电性层为第四系砂砾石和新近系砂岩、砂砾岩、泥岩的反映。第二电性层为中低阻电性层,电阻率值为 20~100 Ω · m,厚度变化在 1 400~1 800 m,推断中低阻电性层为白垩系及侏罗系砾岩、砂砾岩、砂岩、泥岩的反映。第三电性层为高阻电性层, 电阻率值通常大于 100 Ω · m,电阻率呈递增变化,电性层变化稳定、形状相似,电阻率值的高低变化反映了基底内的岩性差异,推断高阻电性层为基底新元古界皋兰群变质岩。

反演电阻率剖面横向变化大,总体表现为测线东北部(北部)电阻率相对较高,主要表现为 A6 线上测点 1700 附近及 4 线测点 7700、5 线测点 7800 附近电阻率等值线均呈陡立状分布,电阻率横向变化大,推测为区域 F_1 逆断层在 3 条测线上的反映,

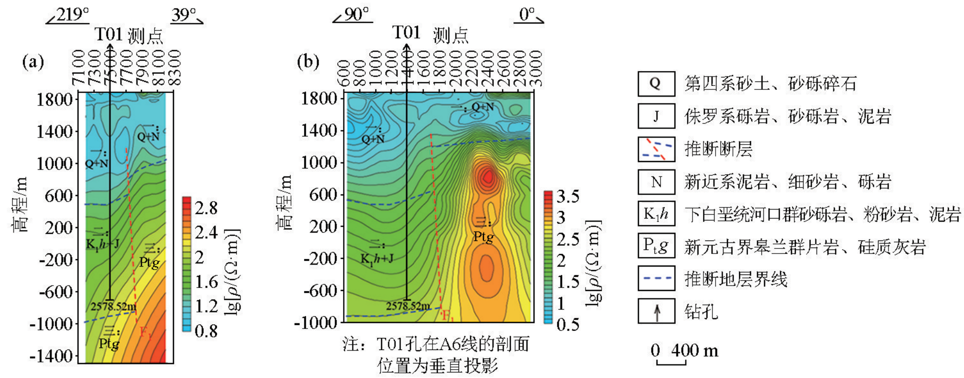

图 3 4 线(a)和 A6 线(b)CSAMT 反演电阻率断面

Fig. 3 CSAMT inversion resistivity section of line 4(a) and line A6(b)

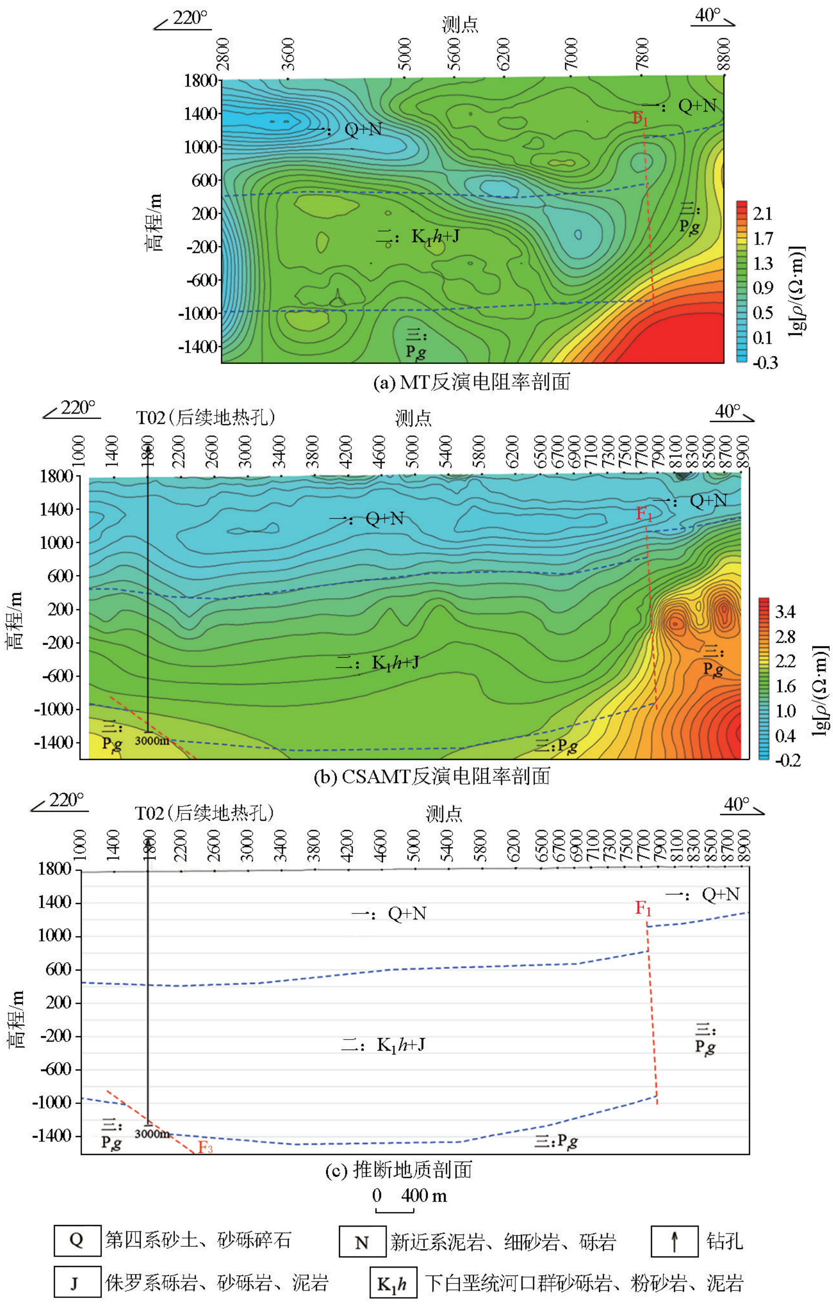

图 4 5 线物探综合剖面

Fig. 4 Geophysical prospecting comprehensive section of line 5

断层走向 N45°W,倾向 NE,倾角约 80°,错断新元古界皋兰群,断距约 2 000 m。另外在 5 线测点 1800 附近,深度约 3 000 m 位置,电阻率等值线呈缓陡立状分布,电阻率横向存在变化,推测为 F_3 正断层在测线上的反映,断面倾向 NW,错段新元古界皋兰群,断距约 200 m。受 F_1 逆断层影响及 F_3 正断层作用,基底深度变化较大,F_1 断层上盘地层抬升,缺失白垩系和侏罗系。断层上盘基底埋深变化在 400~800 m,断层下盘基底埋深变化在 2 600~3 200 m。总体上研究区基底构造形态为一向西倾斜次级断裂构造发育的单斜构造。

2.3　钻探验证

结合物探剖面特征,拟在 F_1 断层下降盘断裂带内布设钻孔,经实地踏勘并考虑后续的开发利用,最终围绕西部恐龙园布设了 1 口地热孔——T01。钻孔位于物探测线 4 线 7500 测点上,成功打出可供开发利用的地下热水,单井出水量 2 148 m^3/d,井口出水温度 46 ℃,井底温度 84.6°。

T01 孔钻遇地层解释深度为:Q,0~39.15 m;N,39.15~1 337.03 m;K_1h,1 337.03~2 252.1 m;J_3x,2 252.1~2 578.52 m(未及底)。从剖面解释可以看出,物探推断地层深度基本与钻探结果相吻合。T01 孔在 2 252~2 382 m 段地层破碎,取心困难,井径从 250 mm 扩大到 600 mm,该段声速曲线呈跳波状,说明地层破碎,严重不均一;深浅双侧向电阻率在 2 252~2 332 m 段数值波动变化大(图 5),说明该层段裂隙发育。依据以上参数推断该段存在断层或大断裂影响带,与物探推断的 F_1 断裂位置基本相符。可以看出,应用可控源音频大地电磁测深和大地电磁测深查明研究区断裂构造位置、热储层埋深及基底构造形态,并为钻探提供依据,其效果是可靠的,取得了较好的地热勘查成果。

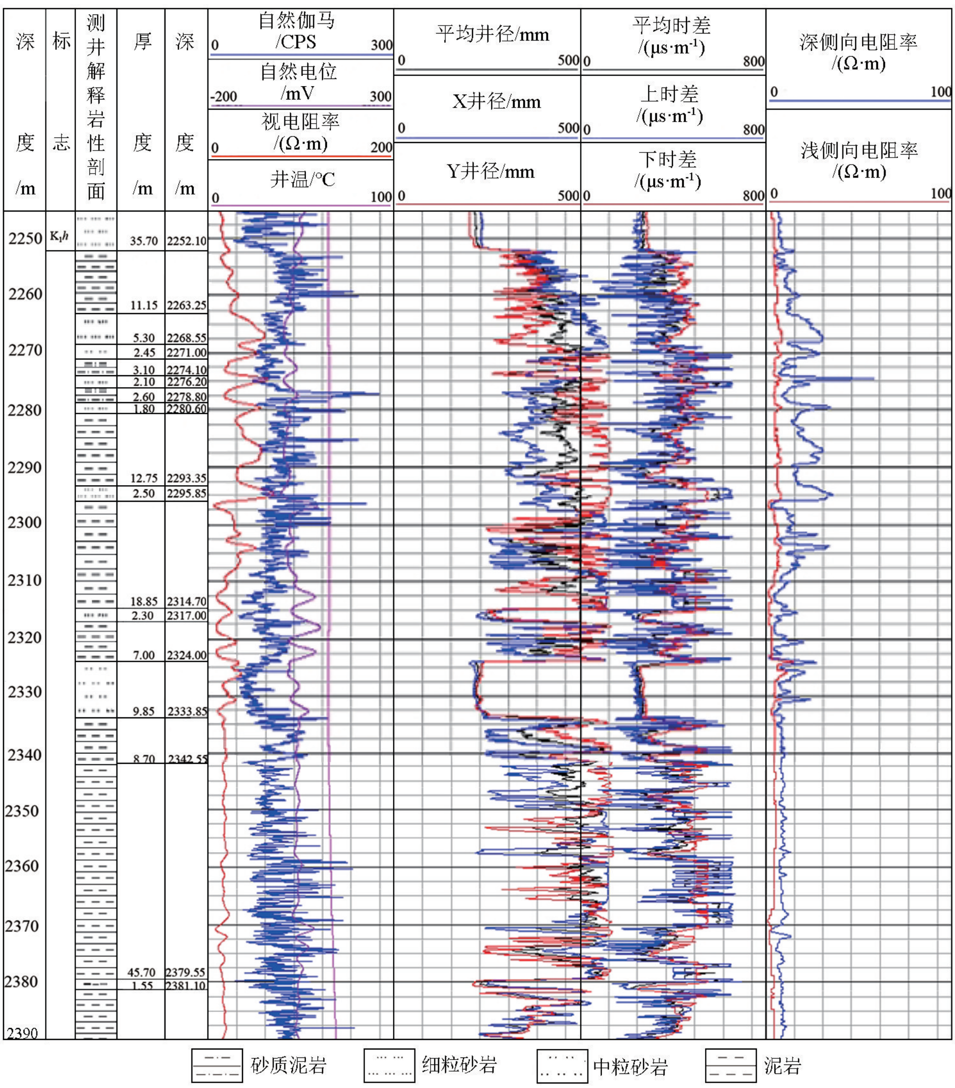

图 5　T01 孔综合测井成果

Fig. 5　Comprehensive log result map of well T01

3　地热地质特征分析

3.1　地热形成条件

根据 T01 孔资料，地面以下 1 000 m 处地温为 40 ℃，2 000 m 处地温达 70 ℃，2 520 m 处地温达 86.5 ℃，平均地温梯度为 3.05 ℃/100 m。侏罗系最大地温梯度达 10 ℃/100 m，2 200 m 以下地温梯度<3.8 ℃/100 m，是中低温地热资源分布的有利地段。结合邻区大量的测温资料进行分析，本区热异常主要来源于地层深部地热增温及沿断裂构造的热水上移对流。研究区内 F_1 断裂带上，从南向北有 T01 地热孔和上大涝池民用供水孔，显示出沿 F_1 断裂带存在断裂构造型地热资源。区域构造资料显示，研究区存在 F_2、F_3 张扭性正断层，断裂构造及形成的破碎带为地壳深部蕴藏的大量地热流向上运移和循环提供了良好的通道。

研究区热储主要分布在 F_1 断层以南区域，分为 3 个热储。新近系热储的岩性为中粒砂岩、细砂岩，埋深为 1 070~1 350 m，总厚度约 50 m；第二热储位于白垩系河口群中部，岩性为中粒砂岩、细砂岩，埋深为 1 360~2 150 m，总厚度约 90 m；第三热储位于侏罗系享堂组，岩性为中粒砂岩、细砂岩，埋深为 2 260~2 450 m，总厚度约 50 m。热储的富水性中等，平均地温梯度 3.05 ℃/100 m，存在地温异常。新近系、河口群以及上侏罗统享堂组的粉砂岩、泥岩隔水性能良好，为致密不透水隔水层，分别构成了新近系、河口群、上侏罗统享堂组热储的盖层。

研究区热源、通道、热储层、热储盖层等热水形成的 4 大因素皆有，初步分析认为兰州新区地热成藏的必要条件有 3 个：有断裂体系作为导水导热通道，本区 F_1 大断裂为主要控热构造，F_2、F_3 断层为热水及热流运移的次要通道；新近系、河口群、上侏罗统享堂组裂隙发育、高孔隙度的细砂岩、中砂岩及粗砂岩为热储层；大面积、大厚度的致密不透水粉砂岩、泥岩为盖层。

3.2　地热模型

研究区地下水的深循环是形成地热系统的主要因素，大气降水和地表水沿着古生界、侏罗系、白垩系、新近系露头岩石裂隙下渗，进行深循环后，将分散在岩石中的热量“清扫”并集中起来，形成地下热流，直接补给热储，或者遇到断层后向上移动，补给热储，热源主要是较高的大地热流[21-23]（图 6）。新近系、白垩系河口群和侏罗系享堂组热储总出水量为 2 148.34 m³/d，经计算新近系热储出水量为 1 190.01 m³/d，占总出水量的 55%；河口群和享堂组热储出水量为 958.33 m³/d，占总出水量的 45%。从热水量所占比例来分析，新近系热储在本区是一个主要的热含水层，由于 F_1 断层没有断达新近系，构造对新近系热储影响小，说明新近系热储是一个层状热储，所以本区地热田具有在 F_1 断层以南全区分布的层状热储特征。

依据民和盆地其他区域的水文地质资料显示，河口群和享堂组热储层一般情况下富水性差，钻孔抽水试验出水量小，但 T01 孔显示河口群和享堂组热储层中等富水，出水量相对较大。分析认为 T01 孔在 F_1 断层附近，并穿越 F_1 断层影响带，断层带裂隙发育造成河口群和享堂组热储层富水性和导水性变好，由此推测本区存在一个以断层带为中心，沿 F_1 断层呈带状分布的热水富水区域，富水区域的宽度受 F_1 断裂构造控制，F_1 断裂构造宽 3~5 km，推测带状分布的热水富水区域宽度不小于断裂带宽度。另外，推测沿 F_3 断层也可能存在一个条带状热储，富水区域的宽度受 F_3 断裂构造控制，推测本区也存在一个以 F_3 断层带为中心沿断层呈带状分布的热水富水区域。从已取得的资料证实，研究区 F_1 构造断裂带具有带状热储特征，由此可以看出盆地内的地热成因类型为断裂构造控制型和沉积盆地型兼有，地热勘查类型为Ⅱ-3 型，是一个中低温对流型地热系统。

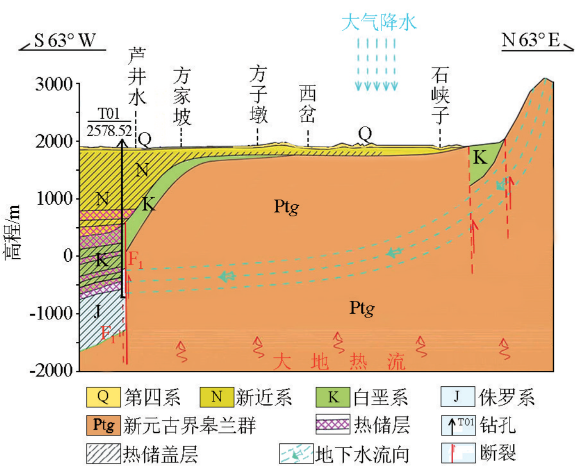

图 6　地热模型

Fig. 6　Geothermal model diagram

4　结论及认识

本次深部地热调查评价工作，初步查明了研究区断裂位置、地层结构、埋深及热储层空间分布，所选用的物探方法是有效的，研究区具备热源、通道、

热储层、热储盖层等热水形成条件,具有较好的地热勘查前景。为今后类似地区开展地热勘查选择物探方法提供了可参考的范例,对邻区地热勘查具有借鉴意义。通过本次地热勘查工作,有几点认识:

1)兰州新区地热成因类型断裂构造控制型和沉积盆地型兼有,具有以盆地传导型层状热储和断裂对流型带状热储特征,有丰富的中低温地热资源。

2)物探先行,地质指导,物探工作应建立在区域地质认识的基础上。F_1 为区域性逆断层,是由大大小小断层所组成的一条长期发育、多次活动、具有复杂性质及演化历史的深大基底断裂带,断裂带内裂隙发育,为地热形成提供了储水空间和运移通道,前期在断裂带内布设钻孔,可形成"双保险",能极大提高地热孔成功率。本次前期围绕 F_1 断裂布置物探工作是有效的,清楚识别了断裂位置,查明了深部热储分布,有效指导了地热孔布设。

3)虽然在断裂附近已施工的地热孔(T01)获得了较好的成果,但本次施工范围有限,不足以查明 F_1 断裂走向上地热的分布情况。其次,在研究区南部存在新近系层状热储和 F_3 断裂走向分布的白垩系、侏罗系带状热储,根据 5 线物探成果,新生界地层厚度约 1 400 m,且向西南有加厚的趋势,因此在南部(远离 F_1 主要控热断裂)结合构造有利部位(F_3 断裂带内)布设 1 口地热孔对全区地热勘查更具有指导意义。下一步将优先考虑在南部开展物探工作及布设地热孔(T02),然后在西北方向围绕 F_1、F_2 断裂布设物探测线,在 2 个断裂交汇处布设 T03 地热孔。通过后续的"2 步走"勘查,全面了解研究区地热地质特征,进一步搞清 F_1 断裂以南断陷盆地内的沉积特征、地温场分布状况以及水文地质条件等。

4)研究区低阻覆盖层厚度大,CSAMT 探测深度受到限制,实际应用中应在保证信噪比的前提下,通过实验确定适合的收发距(尽量采用大收发距)来保证勘探深度,并结合其他物探手段,如 MT 法等,通过多种方法互相佐证,避免单一方法的局限性和盲目性。

参考文献(References):

[1] 王贵玲,张薇,梁继运,等.中国地热资源潜力评价[J].地球学报,2017,38(4):449-459.
Wang G L,Zhang W,Liang J Y,et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientica Sinica,2017,38(4):449-459.

[2] 李百祥,滕汉仁,郝林凤.区域重力在兰州断陷盆地地热勘查中的作用和热储分析[J].西北地质,2004, 37(2):83-88.
Li B X,Teng H R,Hao L F. Application of regional gravitation in the geothermal exploration and analysis of geothermal reserves in Lanzhou fault basin[J]. North Western Geology,2004, 37(2): 83-88.

[3] 刘子锐.甘肃省永登河桥地区地热地质特征及资源潜力评价[D].兰州: 兰州大学, 2019.
Lui Z R. Geothermal geological characteristics and resource potential evaluation of Yongdeng Heqiao area of Gansu pronvince[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2019.

[4] 张子祥.兰州新区西南部地热资源普查报告[R].甘肃煤炭地质勘查院,2020.
Zhang Z X. Survey report of geothermal resources in the southwest of Lanzhou new area[R]. Gansu Coal Geological Prospecting Institute,2020.

[5] 卫平生,张虎权,张景廉,等.民和盆地多种能源矿产共存成藏机理[M],北京:石油工业出板社,2008:10-58.
Wei P S,Zhang H Q,Zhang J L,et al. Coexistence and accumulation mechanism of multi-energy minerals in Minhe basin [M]. Beijing:Petroleum Industry Press, 2008:10-58.

[6] 李百祥.从地温场特征探讨兰州断陷盆地地热资源前景[J],甘肃地质学报,2001,10(1):83-89.
Li B X. According to the features of geotemperature probe into geothermal resources in Lanzhou fault basin [J]. Acta Geologica Gansu, 2001,10(1):83-89.

[7] 黄少鹏.中国大陆地区热流数据的分布及其初步分析[J].地震地质,1989,11(3):17-26.
Huang S P. The distribution of heat flow data in the continental area of China and its preliminary studies[J]. Seismology and Geology, 1989,11(3):17-26.

[8] 姜光政,高堋,饶松,等.中国大陆地区热流数据汇编[J],地球物理学报,2016,59(8):2892-2910.
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.

[9] 雷芳,董治平,刘宝勤,等.甘宁青地区地温场及其与地震的关系[J].甘肃科学学报,1999,11(3):22-27.
Lei F,Dong Z P,Liu B Q,et al. The geotemperature field in Gansu-Ningxia-Qinghai area and its relation to earthquakes [J]. Journal of Gansu Sciences, 1999,11(3):22-27.

[10] 李百祥,俞有峰,宣世进,等.永登县药水沟—红门寺地热资源综合勘查评价[J].甘肃地质学报,2003,12(1):85-91.
Li B X,Yu Y F,Xuan S J,et al. Comprehensive exploration and assessment of the geothermal resource in Yaoshuigou-Hongmensi area of Yongdeng couty [J]. Acta Geologica Gansu , 2003,12(1):85-91.

[11] 中国国家标准化委员会.GB/T 11615-2010 地热资源地质勘查规范[S].2010.
China National Standardization Committee . GB/T 11615-2010 Geologic exploration standard of geothermal resources[S].2010.

[12] 孙海川.CSAMT 和 MT 在兰州新区地热勘查中的应用探讨[J].地下水,2020,42(1):24-27.
Sun H C. Application of CSAMT and MT in geothermal exploration in Lanzhou new area [J]. Ground Water, 2020,42(1):24-

27.

[13] 陈永羲.兰州新区丝绸之路西部国际商旅文综合生态园区地热资源物探勘查报告[R].甘肃省城乡规划设计研究院勘察分院,2017.

Chen Y X. Geophysical exploration report of geothermal resources in the western silk road comprehensive ecological zone of Lanzhou new district[R]. Investigation Branch of Gansu Provincial Institute of Urban and Rural Planning and Design,2017.

[14] 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].世界地质报,2009,28(3):351-360.

Yang Y X,Liu J L,Zhang W J,et al. Applying comprehensive geophysical prospecting method in geothermal exploration in Tianjin area[J]. Global Gelolgy,2009,28(3):351-360.

[15] 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 appliacation of integrated geophysical exploration to geothermal exploration in Jiaxing city[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2011,35(3):319-324.

[16] 祝杰.可控源音频大地电磁法在地热勘查中的应用研究[D].成都:成都理工大学,2012.

Zhu J. The applied technology of controlled source audio magnetotelluric on geothermal field[D]. Chengdu:Chengdu University of Technology,2012.

[17] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0280-2015 可控源音频大地电磁法技术规程[S]. 2015.

People´s Republic of China Ministry of Land and Resources. DZ/T 0280-2015 Technical regulation for controlled source audio magnetotelluric method[S]. 2015.

[18] 吴真玮.大地电磁测深方法在长白山地区地热勘查中的应用研究[D].长春:吉林大学,2013.

Wu Z W. The application of MT to the study of geothermal exploration in Changbai mountain area[D]. Changchun:Jilin University,2013.

[19] 中华人民共和国地质矿产部. DZ/T 0173-1997 大地电磁测深法技术规程[S]. 1997.

Ministry of Geology and Mines of the People´s Republic of China. DZ/T 0173-1997 Technical standards for electromagnetic deepening method[S]. 1997.

[20] 孙海川,刘永亮,邵程龙.综合物探方法在海石湾地区地热勘查中的应用[J].物探与化探,2019,43(2):290-297.

Sun H C,Liu Y L,Shao C L. The application of integrated geophysical exploration to the geothermal exploration in Haishiwan area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2019,43(2):290-297.

[21] 郑希民,王多云,李凤杰,等.兰州—民和断陷盆地地热质条件分析及热储概念模型[J].西北地震学报,2003,25(3):215-220.

Zhen X M,Wang D Y,Li F J,et al. Analysis of geological conditions on geotherm and the conceptual model of geothermal reservoir in Lanzhou-Minhe basin[J]. Northwestern Seismological Journal,2003,25(3):215-220.

[22] 曾昭发,陈雄,李静,等.地球物理勘探新进展[J]. 地球物理学进展,2012,27(1):168-178.

Zeng S F,Chen X,Li J,et al. Advancement of geothermal geophysics exploration[J]. Progress in Geophysics,2012,27(1):168-178.

[23] 魏林森,张凌鹏,王婷,等.兰州市城区地热地质条件分析及资源潜力分析[J]. 中国地质调查,2018,5(2):45-50.

Wei L S,Zhang L P,Wang T,et al. Analysis of geothermal geoological conditions and resources exploitation potential in Lanzhou city[J]. Geoological Survey of China,2018,5(2):45-50.

Geothermal geological conditions of the Western Dinosaur Park block in the Lanzhou New area

SUN Hai-Chuan

(*Gansu Coal Geological Prospecting Institute*, *Lanzhou* 730000, *China*)

Abstract: The Western Dinosaur Park of the Lanzhou New area, located in the Lanzhou-Minhe Basin, has encouraging prospects for geothermal exploration, development, and utilization. Based on the previous results of regional geological structure and geothermal characteristics, this study further investigated the geothermal reservoir horizons and the geothermal geological conditions using both the controlled source audio-frequency magnetotellurics (CSAMT) and the magnetotelluric sounding. Then, available geothermal water with suitable temperatures was discovered by drilling. Based on the geophysical exploration and drilling results, this study deduced and explained the structure and pluton distribution of the study area, analyzed the geothermal geological conditions, and pointed out the future exploration direction. The results of this study can be utilized as a reference for geothermal exploration in adjacent areas of the Western Dinosaur Park and similar areas.

Key words: geothermal exploration; geothermal geological conditions; CSAMT; magnetotelluric sounding; Lanzhou New area

(本文编辑:沈效群)