

基于兰州断陷盆地地热地质条件的石佛沟地热资源潜力评估

陈秀清, 王涛, 黄晓辉, 王宝玉

Evaluation of geothermal resource potential in Shifogou based on geothermal geological conditions of the Lanzhou faulted basin

CHEN Xiuqing, WANG Tao, HUANG Xiaohui, and WANG Baoyu

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306028>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于示踪试验及动态数据的北京小汤山地区地热资源量评价

Tracer test and geothermal resource quantity evaluation based on dynamic data in the Xiaotangshan area of Beijing

杨亚军, 丁桂伶, 徐巍, 李海京, 鲁鹤, 王雨石, 张俊华, 王翊虹 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 196-200

四川广安铜锣山背斜热储性质及地热成因模式

A study of the characteristics of geothermal reservoir and genesis of thermal groundwater in the Tongluoshan anticline near Guang'an in east Sichuan

李明辉, 袁建飞, 黄从俊, 刘慧中, 郭镜 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 36-46

沉积型和火山型地热流体的同位素水文地球化学对比研究

A comparative study of isotopic hydrogeochemistry of geothermal fluids of sedimentary basin type and volcanic type

马致远, 李嘉祺, 翟美静, 吴敏, 许勇 水文地质工程地质. 2019, 46(6): 9-18

西宁盆地地热水特征及回灌结垢风险

Characteristics of geothermal water in the Xining Basin and risk of reinjection scaling

赵振, 秦光雄, 罗银飞, 晁嘉豪, 耿松鹤, 张亮 水文地质工程地质. 2021, 48(5): 193-204

松嫩盆地北部林甸地热田供暖尾水处理试验

An experimental study of heating tail water treatment of the Lindian geothermal fields in the Northern Songnen Basin

李永利, 于长生, 姜智超, 商洁, 张丽华 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 188-194

基于微地震数据的增强型地热储层参数及采热的数值模拟研究

A study of numerical simulations for enhanced geothermal reservoir parameters and thermal extraction based on microseismic data

马子涵, 邢会林, 靳国栋, 谭玉阳, 闫伟超, 李四海 水文地质工程地质. 2022, 49(6): 190-199



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202306028

陈秀清, 王涛, 黄晓辉, 等. 基于兰州断陷盆地地热地质条件的石佛沟地热资源潜力评估 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 213-224.

CHEN Xiuqing, WANG Tao, HUANG Xiaohui, *et al.* Evaluation of geothermal resource potential in Shifogou based on geothermal geological conditions of the Lanzhou faulted basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 213-224.

基于兰州断陷盆地地热地质条件的石佛沟 地热资源潜力评估

陈秀清¹, 王涛¹, 黄晓辉², 王宝玉³

(1. 兰州资源环境职业技术大学, 甘肃兰州 730000; 2. 甘肃省有色工程勘察设计研究院, 甘肃兰州 730000; 3. 甘肃智广地质工程勘察设计有限公司, 甘肃兰州 730000)

摘要: 针对兰州石佛沟景区地热地质条件勘探研究程度较低, 严重制约当地地热资源开发利用这一问题, 在充分搜集整理已有资料的基础上, 总结了兰州断陷盆地地热地质条件和热储特征, 结合可控源音频大地电磁测深法(CSAMT)探测结果, 推断盆地东部南段石佛沟的地热资源开发潜力。结果表明: (1) 分别以深沟桥(F5)、雷培河(F8)隐伏断裂为界, 兰州断陷盆地地热地质条件具有明显差异性, 可分为西部西固城区、中部七里河区、东部城关—石佛沟区; (2) 平面上由西向东不同深度的热储温度呈增加趋势, 垂向上 2 000~2 500 m 深度的地热增温率升高, 可推断为兰州断陷盆地地热开采的基本深度; (3) 东部南段的石佛沟景区潜存层状传导型地热和断裂带状地热资源, 层状地下水赋存于兰州断陷盆地南部边缘地段, 断裂带状地下水赋存于 F2 断裂破碎带或 F2 与 F8 断裂的交汇地段, 据此推断在石佛沟景区可能存在层状和带状“复合型”地热水的富集地段。研究建议断裂带状热储层的地热水勘探开采井深度可按 800~1 100 m 考虑, “复合型”层状热储层的勘探开采井深度可按 1 500~2 000 m 考虑; 预测该地段地下水井口出水温度可达 50~60 °C, 单井涌水量可达 500~1 000 m³/d, 热水水质可达到医疗洗浴质量标准。结果可为当地地热资源勘探和开发利用提供依据。

关键词: 层状传导型地热; 断裂带状地热; 地热资源; 兰州断陷盆地; 石佛沟

中图分类号: P314

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)06-0213-12

Evaluation of geothermal resource potential in Shifogou based on geothermal geological conditions of the Lanzhou faulted basin

CHEN Xiuqing¹, WANG Tao¹, HUANG Xiaohui², WANG Baoyu³

(1. Lanzhou Resources & Environment Voc-Tech University, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. Gansu Nonferrous Engineering Survey, Design and Research Institute, Lanzhou, Gansu 730000, China; 3. Gansu Zhiguang Geological Engineering Survey & Design Co. Ltd., Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Aiming at the problem of low degree of exploration and research of geothermal geological conditions in the Shifogou area, which seriously restricts the development and utilization of geothermal resources, on the basis of available data, the geothermal geological conditions and the characteristics of the thermal reservoir in the Lanzhou faulted basin are summarized. Combined with the exploration results of the controlled source audio

收稿日期: 2023-06-17; 修订日期: 2023-08-13

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 甘肃省教育厅产业支持计划项目(2021CYZC-01)

第一作者: 陈秀清(1969-), 女, 本科, 正高级工程师, 主要从事环境地质工程教学与科研工作。E-mail: 494425273@qq.com

frequency magnetotelluric (CSAMT) method, the potential of geothermal resources development in the Shifogou area in the southern part of the basin is inferred. The results show that (1) the geothermal geological conditions in the Lanzhou faulted basin are obviously different. Taking the buried faults of Shengouqiao (F5) and Leitai River (F8) as the boundary, respectively, the faulted basin can be divided into the western Xigu district, central Qilihe district and eastern Chengguan-Shifogou district. (2) The geothermal temperature increases from west to east, and increases vertically from the depth of 2 000 to 2 500 m, inferring that this is the basic depth of geothermal exploitation in the Lanzhou faulted basin. (3) In the southern section of the eastern part may exist layered-conductive geothermal resources and fault-zone geothermal resources, it is inferred that there may exist “combined type” of layered and banded geothermal water in the Shifogou district, which is located in the F2 fracture zone or the intersection of F2 fracture zone and F8 fault zone. It is suggested that the exploration and production well depth of geothermal water in the faulted-zone thermal reservoir should be considered as 800–1 100 m, and that the exploration and production well depth of the “combined” layered thermal reservoir should be considered as 1 500–2 000 m. The wellhead geothermal water temperature in this area is expected to reach 50–60 °C, the single well yield can reach 500–1 000 m³/d, and the quality of the geothermal water can reach the standard for medical bathing. The results can provide a basis for geothermal resources exploration in Lanzhou.

Keywords: layered conductive geothermal resources; faulted zone geothermal resources; geothermal resources; Lanzhou faulted basin; Shifogou

在缓解能源压力、减少二氧化碳排放、应对全球气候变化的背景下,加大包括地热能在内的清洁能源的开发尤显重要。我国有高温地热资源,但以中低温地热资源为主。高温地热资源主要集中在藏南、滇西、川西和台湾地区^[1],如 20 世纪 70 年代就投入开发的羊八井地热田,是我国第一个实现供电的地热田。张萌等^[2]通过分析西藏谷露高温地热系统的水文地球化学特征研究其成因模式,估算热储温度可达 195~260 °C;章旭等^[3]研究了藏南裂谷带的沃卡地堑地热系统,估算热储温度为 120~200 °C,丰富了西藏中高温地热系统成因机理研究;邹俊等^[4]分析了日喀则市谢通门县卡噶温泉成因,构建地热地质模型,分析资源潜力。云南地区的高温地热研究包括腾冲热海^[5]、瑞丽地热田^[6]等。四川的高温地热系统主要分布在甘孜地区^[7-8],孙东^[9]等则基于已有资料对整个四川盆地的热储特征进行分析,认为四川盆地多属于中低温地热资源。史杰等^[10-11]对新疆西部塔什库尔干县中高温地热系统开展了较为全面的研究,包括地热水的水文地球化学特征和同位素特征等。以往中低温地热研究主要集中在我国东南沿海、东部地区、松辽盆地等地区^[1,12],近年来中东部地区的低温地热系统研究也受到越来越高的关注度,如雄安新区^[13]、河北沧州地区^[14]和四家地热异常区^[15]等。地处生态脆弱区的西北部地区,社会经济发展更需要新能源的支持,如银川盆地东缘地热勘探就取得了新突破^[16-17]。兰州

作为西北重要城市,生态环境脆弱而大气污染又较为严重,勘查开发地热资源尤为重要^[18]。

区域研究资料表明,兰州断陷盆地地温梯度为 3.5~4.2 °C/100 m,大地热流值平均为 78 mW/m²^[18];2015 年以兰州市城区 260 km² 的范围开展专项地热勘查,在七里河—安宁断陷盆地中央部位实施了一眼 2 502.0 m 深的勘探孔,单井抽水量稳定在 90 m³/h,井口水温 74 °C,证明七里河—安宁小型断陷盆地存在丰富的地热水资源^[19-20]。孙海川^[21]利用物探及钻探成果分析了兰州新区恐龙园的地热地质条件;李百祥等^[22]通过综合物探方法探讨了位于兰州东南部的榆中盆地地热资源潜力并提出开发靶区。总体上兰州城区地热资源的勘查研究尚处于初步阶段,勘探程度不均,虽然对兰州断陷盆地层状地热资源热储特征已形成比较普遍的认识^[23-26],但涉及盆地南北边界控热构造对地热流体的作用与影响的研究甚少,尤其是对业界高度关注的石佛沟地区的地热地质条件以及资源潜力研究几乎处于空白。

为此,文章在充分搜集整理已有资料的基础上,总结了兰州断陷盆地地热资源边界条件和带状构造的控热作用,并以盆地地热地质条件为基础,结合可控源音频大地电磁测深法(CSAMT)探测结果,推断了盆地东部南段石佛沟的断裂构造位置及其空间分布特征和热储层埋藏深度,分析了该地段地热资源开发潜力,为地热钻探提供依据。

1 地质背景

兰州断陷盆地形成于新生代第四纪初期, 东西向长约 35 km、南北向宽 10~15 km、面积约 380 km², 呈“菱”形展布。兰州地区在大地构造上处于祁吕贺兰“山”字型构造体系前弧西翼与河西系的复合部位, 同时受到陇西旋扭构造的改造, 地貌上属青藏高原与黄土高原的结合地带, 构造活动强烈、深大断裂发育, 构造形迹较为复杂, 新生代以来的构造运动也十分活跃, 地貌类型变化较大。

根据区域地热地质调查和重力调查成果^[23-26], 形成兰州断陷盆地的主控断裂包括盆地北缘的金城关断裂(F1)和盆地南缘的宋家沟一直沟门断裂(F2)。F1、F2 断裂呈 NWW 向展布, F1 属张性正断层性质, F2 具压性逆冲性质, 均属新构造活动性断裂; 同时发育有

深沟桥(F5)、雷培河(F8)等 NNW 向活动性隐伏断裂, 这些断裂以张拉平移或张拉阶梯状沉陷为主要特征(正断层性质), 主要控制了断陷盆地沿东西向基底的埋藏深度及中新生界的厚度。

F1 以北主要出前露寒武系皋兰群(AnCGL)片岩、片麻岩等变质岩, 加里东期花岗岩(γ_3)及古近系西柳沟组($E_{1,x}$)砂岩、砂质泥岩等; F2 以南主要出露震旦系兴隆山群(Z_1X)玄武岩、凝灰岩、千枚岩等变质岩, 下白垩统河口群(K_1Hk)砂岩、砂质泥岩等; 盆地基底为皋兰群或兴隆山群变质岩, 构成盆地的主体地层为厚 1 000~1 300 m 的新近系~古近系砂岩、砂质泥岩, 厚 200~400 m 的白垩系砂岩、砂砾岩, 第四系厚度变化较大, 在七里河地段可达 200~300 m, 其余地段一般为 20~50 m(图 1)。

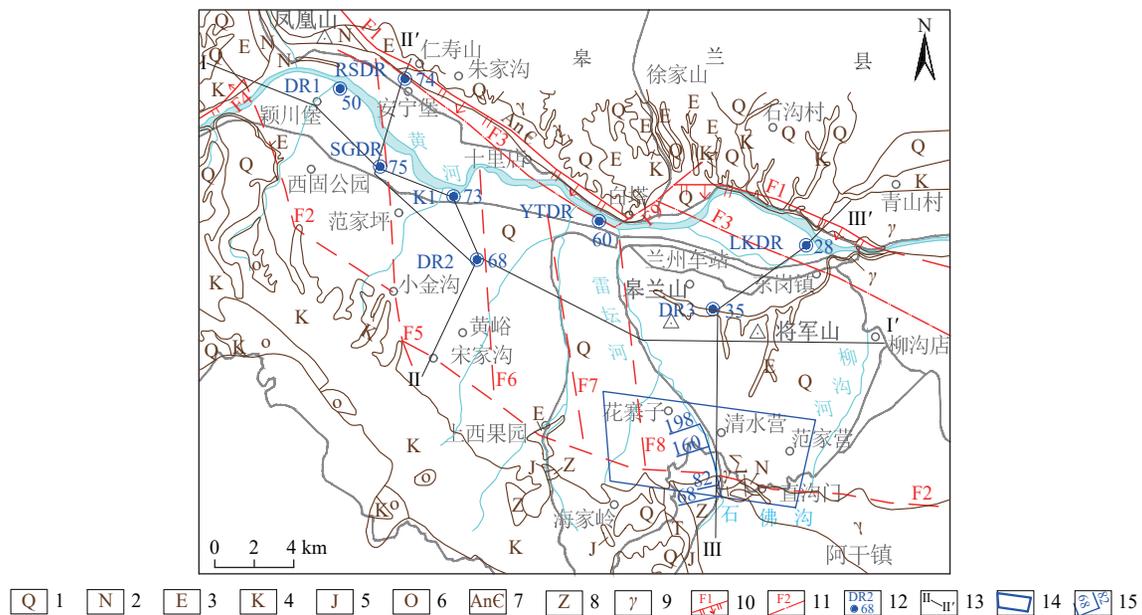


图 1 兰州断陷盆地地热地质图(修编自文献[25-26])

Fig. 1 Structural geological map of the Lanzhou fault depression basin (modified from Ref. [25-26])

1—第四系; 2—新近系; 3—古近系; 4—白垩系; 5—侏罗系; 6—奥陶系; 7—前寒武系; 8—震旦系; 9—加里东中期侵入岩; 10—实测正断层及编号;
11—实测或推测隐伏断层及编号; 12—已实施地热钻孔(编号及孔口水温度/°C); 13—地热地质剖面线及编号; 14—产业支撑项目范围;
15—产业支撑项目 CSAMT 剖面位置

2 数据来源及研究方法

本文获取了兰州断陷盆地环境地质勘察和区域重力调查综合成果, 收集了已钻探形成的 8 眼地热井的地层数据, 采集地热井水样进行水化学分析, 通过 CSAMT 推断断裂构造和基底埋深。

CSAMT 是观测人工供电的音频电磁场的电磁勘探方法, 由于所观测的电磁场的频率、强度和方向可

由人工控制, 克服了天然场源信号微弱的缺点, 较传统的电磁勘探方法具有工作效率高、勘探深度大、分辨能力强、精度高等优势, 应用十分广泛, 包括岩溶探测^[27]、地热勘查^[28-29]、资源勘探^[30]等众多领域。

根据研究区的地形、电极接地条件、外部干扰源等因素, 选择与兰州断陷盆地南部边界主控断裂 F2 基本垂直的勘测断面, 断面南起石佛沟沟口, 北至清水营, 方位 345°, 总长 3.3 km(图 1)。断面以岷口子为

界,北部为黄土丘陵区,南部为基岩山区(属祁连山东段余脉),高差 200 m 以上。

采用 eTrex201x 型高精度手持 GPS 开展测量工作。将设计测线起、止端点理论坐标输入手持 GPS 中储存,利用 GPS 建立航线导航,在偏航距和距离均小于 1 m 的情况下存储实际点位,测线与测点编号依从南到北,由小到大双编号设置。

采用美国 Zonge 公司生产的 GDP—32 II 型多功能电法工作站进行观测。发电机功率 30 kW,本次发射最大电流为 18 A。采用电偶源扇形装置,发射偶极与测线方向平行,测量偶极 MN 区域在 AB 偶极为上底所张角(实际上均在 30°以内)的梯形面积内。极距选择参照规范规定和以往在兰州盆地开展的 CSAMT 工作,一方面选择具有较好的信噪比,电偶源发射电磁场能够有效压制干扰场,采集数据具有较明显的重现性,从而保证数据的质量;另一方面探测深度符合要求,避免数据反演过早进入过渡区低谷,有效探测深

度应达到 2 500 m 以深。选定发射极极距 AB 为 1 200 m,接收极 MN 为 50 m。发射偶极长度及各剖面收发距为 6 930 m。

3 兰州盆地地热地质条件

3.1 地热条件分区

通过整理兰州城区 8 眼地热井的资料^[25-26],获得各钻孔揭露的地层结构(表 1),基于此绘制各钻孔柱状图,如图 2 所示。由表 1 和图 2 可以看出,兰州中生代断陷盆地除覆盖不同厚度的第四系外,主要地层是新近系和古近系,其次是白垩系。中部古近系分布稳定、厚度大;西部和东部盆地部分分布白垩系。盆地西部基底埋藏深度大于 2 500 m;中部基底埋深 2 300 ~ 2 400 m;东部深度变浅,1 300 ~ 1 800 m,且变化大。这个地层结构及变化特征是形成地热地质的基本条件。

表 1 盆地地热井揭示的地层结构

Table 1 Basin stratigraphic structure revealed by drilled holes

| 分区 | 编号 | 孔深/m | 地层厚度(层底深度)/m | | | | |
|----|------|---------|--------------|--------------|----------------|----------------|--------------------------------|
| | | | Q | N | E | K | AnCGL |
| 西部 | DR1 | 2 500.3 | 10.0 | 270.0(280) | 1 335.0(2 090) | >410.3(>2 500) | |
| | SGDR | 2 508.3 | 235.0 | 510.0(745) | 1 763.3(2 508) | | |
| | RSDR | 2 330.0 | 278.0 | 511.0(789) | 1 532.0(2 321) | | >9.0(>2 330) |
| 中部 | K1 | 2 502.0 | 386.0 | 486.0(872) | 1 504.0(2 376) | | >126.0(>2 502) |
| | DR2 | 3 000.5 | 812.5 | 610.5(1 423) | 1 006.0(2 429) | | >571.5(3 000) |
| | YTDR | 2 003.0 | 237.0 | 600.0(837) | 890.0(1 727) | | >276.0(>2 003) |
| 东部 | DR3 | 2 000.2 | 22.5 | 65.0(87.5) | 964.5(1 052) | >948.2(2 000) | |
| | LKDR | 2 006.0 | 34.2 | 125.3(160) | 714.3(874) | 391.4(1 266) | 257.6+483.2(γ)(1 523) |

结合盆地地热地质条件(图 1)和热储含水层富水性(富水性数据见表 2)等特征,绘制地热盖层和热储层厚度分布图(图 3)和水文地质平面图(图 4)。由图可以看出,盆地地表第四系松散层和上部新近系泥岩地热盖层,F5 断裂以西地段厚 200 ~ 1 000 m,F5 断裂以东、F8 断裂以西地段厚 1 000 ~ 1 400 m,F8 断裂以东地段厚 200 ~ 600 m,如图 3(a)所示。盆地古近系砂岩、砂砾岩和白垩系砂岩、砂砾岩等地下热水热储层,F5 断裂以西地段厚 100 ~ 600 m,F5 断裂以东、F8 断裂以西地段厚 600 ~ 800 m,F8 断裂以东地段厚 100 ~ 400 m,如图 3(b)所示。据此,以 F5、F8 隐伏断裂为界,将断陷盆地分为西固城区、中部七里河区、东部城关—石佛沟区三个区。西固城区西起寺儿沟 F4 断裂,东至深沟桥 F5 断裂,南至 F2 断裂、北至金城关 F1 断裂,面积约 66 km²;中部七里河区东西向长约

14 km,南北向宽约 10 km,面积约 166 km²;东部城关—石佛沟区,西起 F8 断裂、东至桑园子隆起、南至 F2 断裂、北至 F1 断裂,面积约 150 km²。

3.2 水热条件

兰州断陷盆地目前的 8 眼地热井在 3 个区均有分布。西部的西固城区与安宁区有 RSDR、DR1 和 SGDR,钻孔揭露地热顶板埋深 800 ~ 1 000 m,热水含水层富水性中等,单位涌水量一般为 0.05 ~ 0.20 L/(s·m),热储水温 40 ~ 70 °C(图 4、表 2)。

中部七里河区已经实施的地热钻孔包括 DR2、K1 和 YTDR,钻孔揭露地热顶板埋深 789 ~ 1 423 m,底板埋深 2 321 ~ 2 429 m,热水含水层分布稳定,富水性丰富,单位涌水量一般为 0.1 ~ 0.5 L/(s·m),热储水温 60 ~ 70 °C(图 4、表 2)。

东部城关—石佛沟区,是兰州断陷盆地研究程度

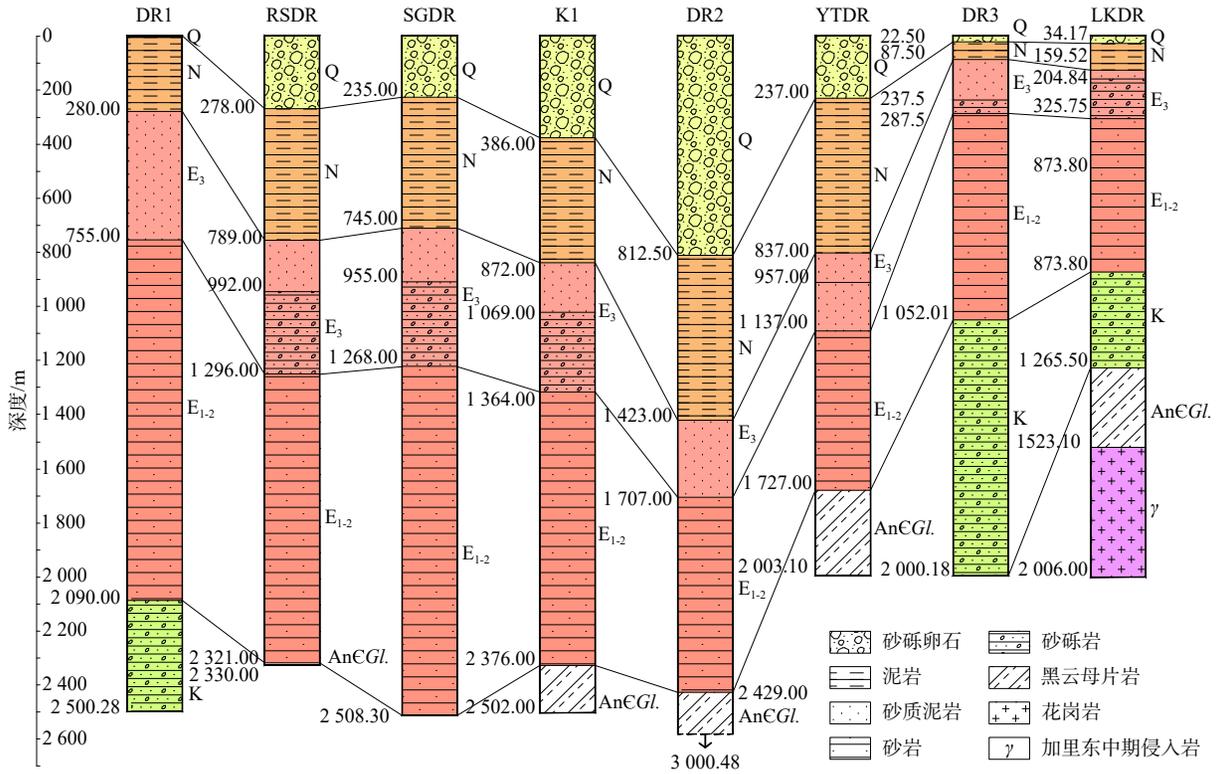


图 2 兰州断陷盆地地热地质剖面图 (修编自文献 [25 - 26])

Fig. 2 Geothermal hydrogeological profile of the Lanzhou fault basin (modified from Ref. [25 - 26])

Q—第四系; N—新近系; E—古近系; K—白垩系; AnCGI—皋兰群

表 2 地热资源和水质主要指标

Table 2 Main indicators of geothermal water resources and water quality

| 分区 | 编号 | 地热资源主要指标 | | | | | | 水质主要指标/(mg·L ⁻¹) | | | | | | |
|----|------|----------|--------------------------------------|-------|---|-------|------|------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|---|
| | | H/m | Q/(m ³ ·d ⁻¹) | S/m | q/(L·s ⁻¹ ·m ⁻¹) | M/m | T/°C | 氟 | 溴 | 锶 | 锂 | 偏硼酸 | 偏硅酸 | |
| 西部 | DR1 | 19.7 | 1238.6 | 268.2 | 0.05 | 456.0 | 50 | — | — | — | — | — | — | — |
| | SGDR | 23.5 | 1530.2 | 137.5 | 0.13 | 640.3 | 75 | 1.08 | 6.00 | 16.17 | 0.541 | 3.15 | 58.18 | |
| | RSDR | 18.1 | 2101.7 | 165.1 | 0.15 | 432.0 | 74 | 0.94 | 13.80 | 35.71 | 0.976 | 16.96 | 53.56 | |
| 中部 | K1 | 22.6 | 2148.3 | 75.2 | 0.33 | 600.0 | 73 | 1.10 | 1.95 | 31.23 | 0.940 | 3.33 | 48.75 | |
| | DR2 | 59.14 | 2186.6 | 100.0 | 0.25 | 600.0 | 68 | — | — | — | — | — | — | |
| | YTDR | 6.0 | 185.6 | 130.0 | 0.02 | 450.0 | 60 | 2.40 | 0.04 | 2.22 | 0.390 | 15.14 | 35.76 | |
| 东部 | DR3 | 43.0 | 737.0 | 290.0 | 0.03 | 157.0 | 35 | — | — | — | — | — | — | |
| | LKDR | 5.0 | 163.0 | 235.0 | 0.01 | 376.0 | 42 | 1.13 | — | 21.74 | 0.390 | 4.48 | — | |

注: H为水位埋深; Q为涌水量; S为降深; q为单位涌水量; M为热储层厚度; T为孔口水温度。依据《天然矿泉水地质勘探规范》(GB/T 13727—1992), K1和LKDR为锶水, SGDR和RSDR为锶水、硅水, YTDR为氟水, SGDR和RSDR中的溴达到了矿水标准, SGDR和YTDR中的偏硼酸达到了矿水标准; “—”表示未测。

最低、热储含水层分布最复杂、富水性相对较差的地段,大致以皋兰山为界,又可分为北段和南段。北段指皋兰山以北的城关城区,已实施 DR3 和 LKDR 2 个地热井,揭露以古近系西柳沟组砂岩为主的热储顶板埋深只有 65 ~ 125 m,底板埋深在 1 266 ~ 2 000 m,热水含水层埋藏深度由北向南逐渐加大,含水层富水性较弱,单位涌水量一般小于 0.3 L/(s·m),热储水温 30 ~ 40 °C(图 4、表 2)。南段指皋兰山以南的七里河石佛沟地段,该地段是兰州断陷盆地地热勘查研究的空白

区,目前为止尚无勘探性钻孔,只有一些物探成果涉及本区段。

3.3 地温场特征

根据已经实施的地热钻孔结合重力物探等编制不同深度的温度场,如图 5 所示,可以看出平面上由西向东不同深度的地热温度大致呈增加趋势: 1 000 m 处的最高温度,中部为 50 °C,东部和西部均为 46 °C; 2 000 m 处的最高温度由西部的 64 °C、中部的 60 °C 增加至东部的 68 °C; 2 500 m 处的最高温度由西部和

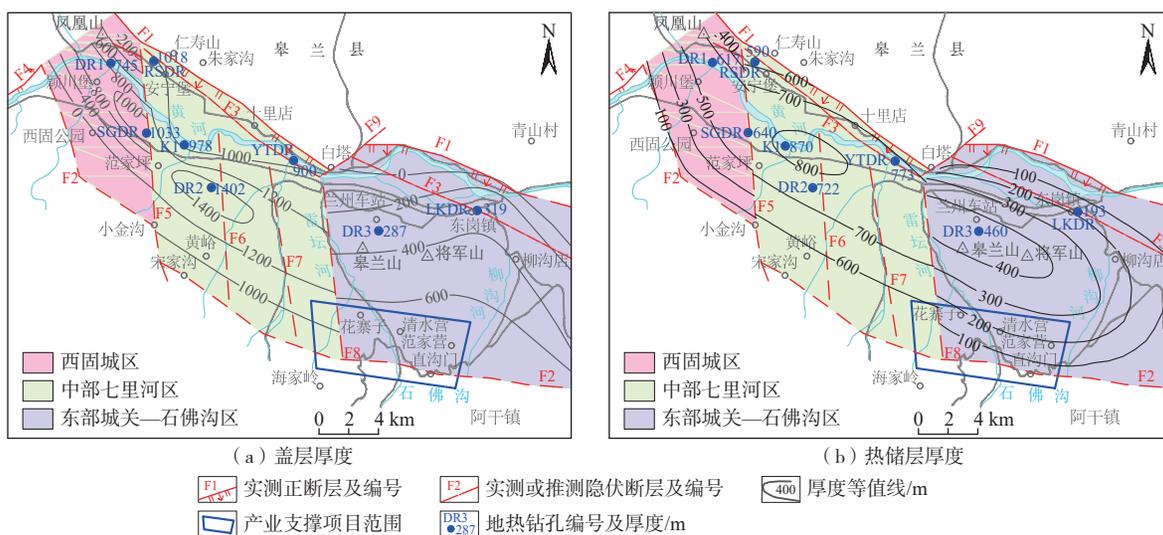


图 3 兰州断陷盆地地热盖层和热储厚度图 (修编自文献 [25 - 26])

Fig. 3 Thickness of geothermal caprock and reservoir of the Lanzhou fault basin (modified from Ref. [25 - 26])

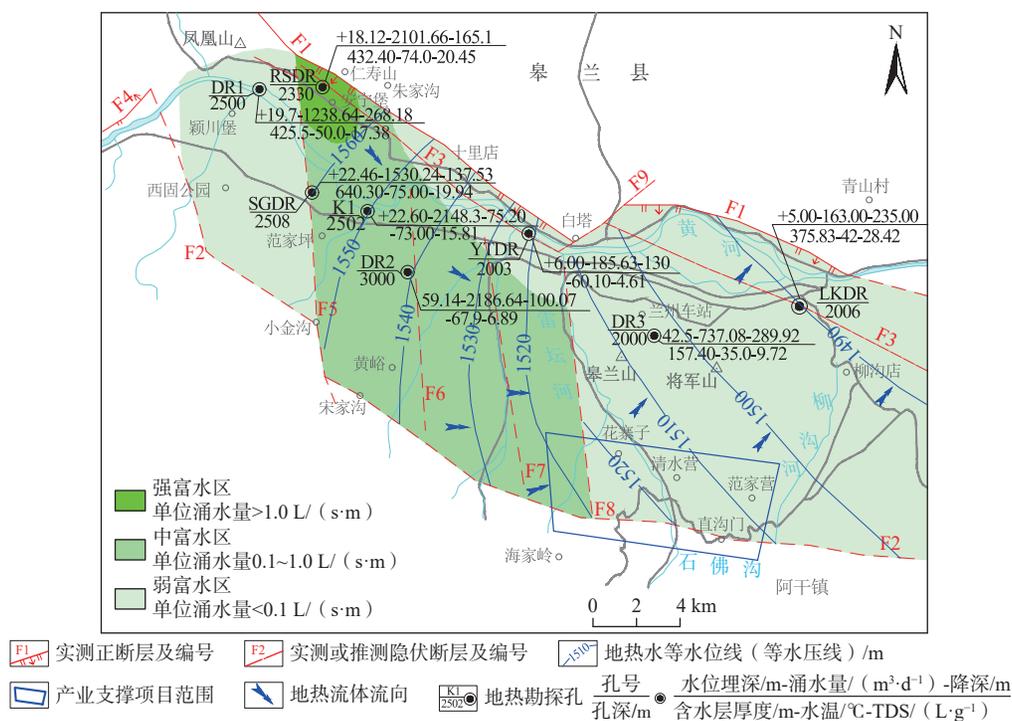


图 4 兰州断陷盆地地热水文地质平面图 (修编自文献 [25 - 26])

Fig. 4 Geothermal hydrogeological map of the Lanzhou fault basin (modified from Ref. [25 - 26])

中部的 74 °C 增加至东部的 80 °C。

剖面上,地表至 1 000 m,地热增温率为 32 ~ 36 °C/km(根据观测资料,地表约 20 m 地温常温约 14 °C),增温率高于正常,可称地热增温异常;1 000 ~ 2 000 m,地热增温率为 10 ~ 22 °C/km,增温率低于正常,可称温度缓冲带;2 000 ~ 2 500 m,地热增温率为 20 ~ 28 °C/km,增温率升高,判断为趋近热源的显示,可认为是兰州断陷盆地地热开采的基本深度。

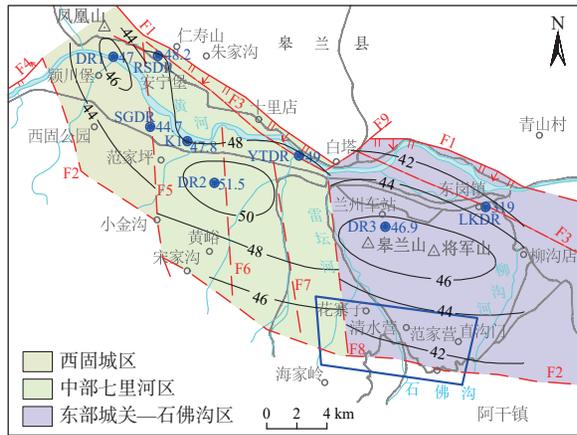
4 石佛沟地热潜力评估

4.1 CSAMT 解译结果

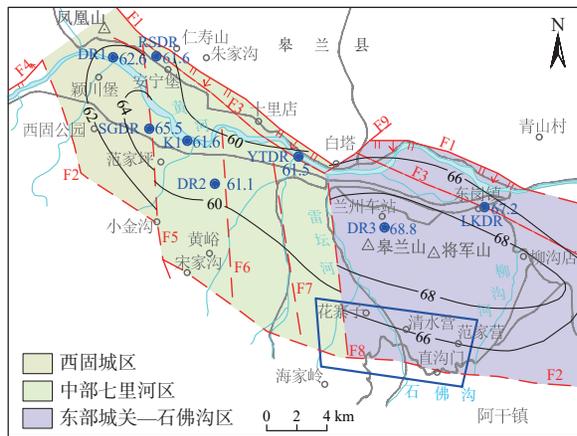
根据研究区的地形、电极接地条件、外部干扰源等因素,布设的 CSAMT 探测及解译结果见图 6。

4.1.1 推断地层

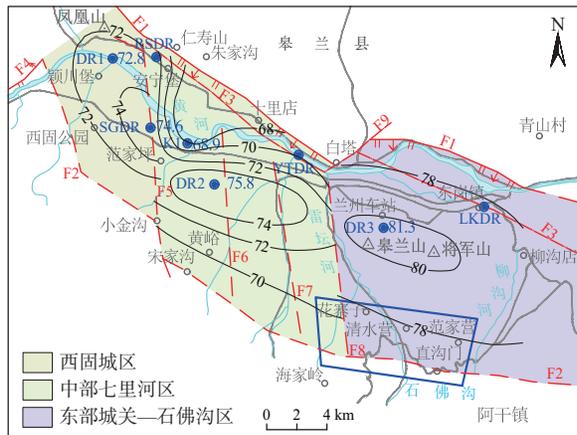
图 6 为该剖面二维反演视电阻率等值线色阶图及综合解释推断断面图。由图可见,该断面兼有水平方



(a) 1000 m 地温场图



(b) 2000 m 地温场图



(c) 2500 m 地温场图

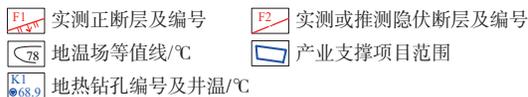


图 5 兰州断陷盆地不同深度地温场图 (修编自文献 [25-26])
 Fig. 5 Map showing geothermal temperature field at different depths in the Lanzhou faulted basin (modified from Ref. [25-26])

向的分带性和垂直方向的分层性, 视电阻率变化的规律性较强, 成为本次推断解释的主要依据。

由图 6 可见, 第四系厚度北厚南薄变化较大, 北段

朝盆地方向渐厚, 最厚处近 200 m, 至南端山区则灭失。其下, 大致以岷口子 102、104 点为界, 其色阶剖面(图 6a)反映了南部隆起山体和北部沉积盆地的特征。南部为高阻体, 对应于震旦系兴隆山群(Z₁X)或石英闪长岩等, 构成了隆起区的主体。

北部为相对低阻区, 层状特征较明显, 分层由浅到深推断如下: 新近系甘肃群(NG.), 黄土层以下, 向北深度、厚度加大, 埋深 0~235 m, 厚 180~480 m。岩性为桔红色-桔黄色泥岩、砂质泥岩、砂岩夹薄层砾岩, 一般不含水, 为隔水层, 即为地热盖层。古近系亦呈南薄北厚变化趋势, 向北深度、厚度加大, 厚 120~540 m。岩性为砂岩、泥岩、砂砾岩, 富水性较好。

下白垩统河口群(K₁Hk.), 埋深由南及北 200~1300 m, 厚 500~600 m。岩性为河流相细-粉砂岩、黏土岩, 含水性微弱, 在上部风化层含水性或达中等。

侏罗系在剖面中段底部, 埋深 1000~1800 m, 162 点附近以北斜下出图, 厚度未探明。侏罗系中统窑街组(J₂y)和上统亭堂组(J₃x)在山前东西均有出露, 物性上没有显著区别, 因此无法断定此段具体为哪一组, 或两者兼有。从岩性上判断, 窑街组分砾岩段(J₂y¹)河流相砂砾岩、粗砂岩和含煤段(J₂y²)河湖相细砾岩、砂岩、页岩夹煤层, 含水性应在微弱-中等之间; 而亭堂组为河湖相砾岩、细砂岩、黏土等, 含水性弱。

4.1.2 推断构造

按照图 6 断面视电阻率水平分带的特征, 在地面投影岷口子 102—104 点附近自南至北视电阻率由大变小的梯级带处可推断为断层 F2。

推断断层 F2 产状倾角 78°~82°, 倾向 S, 走向为近 EW 向, 其性质为山前隐伏逆断层。对照以往地矿、煤田、地震等部门对兰州一榆中盆地南缘界线的研究, 该推断断层基本与兴隆山北缘断裂吻合。

勘测结果显示 2 种类型的曲线特征非常明显地反映了断层 F2 以南基岩山地和北部断陷盆地地质结构, 即高阻背景曲线和低阻背景曲线, 其代表点分别为 82 点和 160 点(图 1、图 7、图 8)。82 点位于岷口子以南, 视电阻率值一般大于 300 Ω·m, 反映了隆起出露的震旦系兴隆山群变质岩电性特征; 160 点位于测线北段, 视电阻率值明显降低, 且呈高-低-高 H 型三层结构, 是沉积盆地第四系干燥高阻砂砾层、新近系低阻泥岩、古近系和白垩系含水砂岩以及含水基岩风化层等低阻层和基底变质岩高阻层状结构电性特征的反映。

4.1.3 宋家沟断裂及兰州断陷盆地南部边界

F2 断层走向 NWW, 倾向 210°~230°, 倾角 78°~82°。

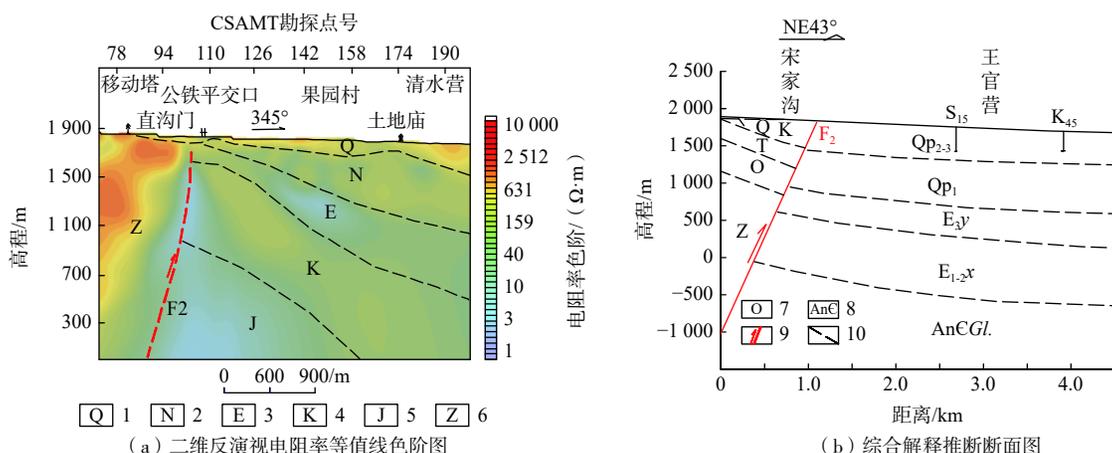


图 6 二维反演视电阻率等值色阶及推断解释断面图

Fig. 6 2D inversion of apparent resistivity equivalent chromatic order and inferred interpretation section

1—第四系; 2—新近系; 3—古近系; 4—白垩系; 5—侏罗系; 6—震旦系; 7—奥陶系; 8—前寒武系; 9—断层; 10—推断地层界线

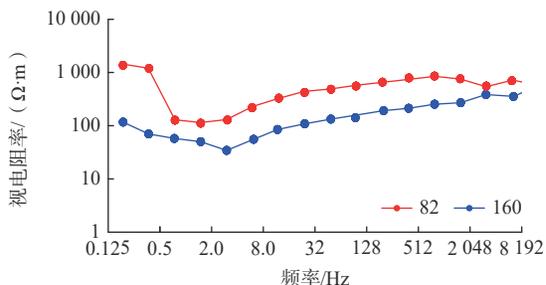


图 7 CSAMT 代表点 82、160 的测深曲线

Fig. 7 CSAMT electrical sounding curve of representative monitoring point 82 and 160

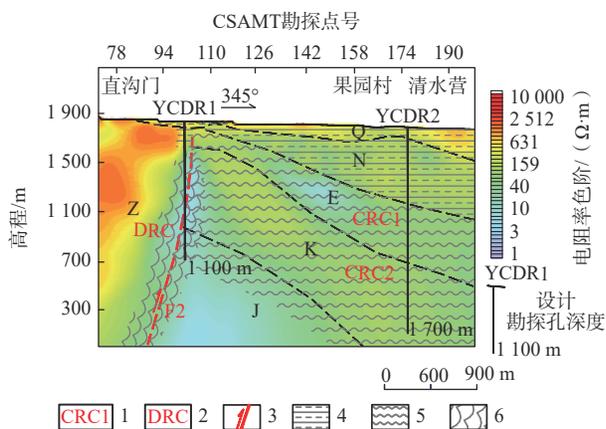


图 8 石佛沟地段 CSAMT 物探推断地热综合成果图

Fig. 8 Comprehensive result map of geothermal inferred by geophysical prospecting in the Shifugou section

1—层状热储及编号; 2—断裂带热储编号; 3—逆冲断裂; 4—地热盖层; 5—盆地层状热储; 6—断裂带热储

受 NNW 向深沟桥断裂(F5)、雷坛河断裂(F8)的南北错动, 该断裂各段差异性活动较为明显, 西段上盘(南盘)为白垩系, 下盘(北盘)为新近系、古近系等; 东段(与 F2、F8 相交处以东)上盘以前震旦变质岩和少量

古生代沉积岩为主, 下盘则以大面积古近系地层为主。总体, F2 断层南盘均以结构密实、胶结完好、成岩作用强的白垩系及前震旦变质岩为主, 岩石孔隙裂隙均不发育, 透水性极差, 且断面由于逆冲挤压、断层泥充填而闭合, 常形成水热阻滞带, 上覆的古近系、新近系等地层已被侵蚀殆尽(图 8)。而断层北盘沉积了大厚度的新生代地层, 尤其是以古近系西柳沟组砂岩为主的热储层分布较广, 因此, 分析认为 F2 断层属于兰州坳陷地热田的南部边界。

4.2 热储概念模型

石佛沟地处兰州断陷盆地东南部边缘, 根据热水的类型分析, 一是处于断陷盆地层状传导型地热盆地的南部边缘, 二是同时处于宋家沟 F2 断裂与雷坛河 F8 断裂交汇带状对流型地下水形成地段, 所以可称该地段为两种地热类型的“复合型”地热的概念模型。

4.2.1 层状热储条件

层状盆地地段的热储、盖层、热源等, 与已经基本探明的盆地其他地段的类似。

(1) 热源及热储层

除随深度自然增温, 系统热源还有来自地壳以下的上地幔热源、地壳岩层中放射性元素产生的放射热等叠加型热源^[14, 31-32]。主要热储地层为古近系及白垩系砂岩, 受南部 F2 逆冲型活动断裂构造的影响, 与盆地中部相比, 产生了向上的拖拽而埋藏深度渐浅、呈向 NNE 或 NE 向缓倾分布, 总厚度由南部 F2 断层附近的约 300 m 向盆地内部(向北)逐渐增加至 600 m。盆地地热钻孔热储地层岩石孔隙性、含水性指标测试结果: 古近系西柳沟组(E_{1-2x})山麓相桔红色块状疏松粗

砂岩、含砾粗砂岩,岩石孔隙度 24.2%~25.8%,视含水饱和度 76.9%~88.6%;下白垩统河口群(K₁Hk)河湖相红色碎屑岩,孔隙度 20.0%~22.4%,视含水饱和度 66.7%~83.6%,均可形成盆地深部层状热储。

(2) 热储盖层

地表第四系黄土和冲、洪积砂砾卵石层,是地表浅部的热储盖层。分布连续、厚度稳定、岩性均匀的新近系泥岩,埋深 50~200 m 以下,厚 300~500 m,是比较理想有效的热储盖层。

(3) 地下热水的补给来源

从图 4 可以看出,兰州断陷盆地地热水循环由西向东、由北向南径流,石佛沟景区部位正好是径流排泄的下游集中地段,所以从地下水的补给径流排泄条件看,该地段具有良好的地下热水来源,在热储岩性、上部盖层等条件具备时,形成较丰富的地热水资源是有非常有利的条件。

4.2.2 带状热储条件

带状热储是指形成并循环于断陷盆地南侧宋家沟一直沟门断裂(F2)带中的地热水。

(1) 热源及热储层

和层状热储不同,断裂型带状热储一般为对流型地下热水资源。逆冲断层尤其是高角度逆断层(断面倾角>45°),在形成过程中,一是受外力挤压拉拽的同时在岩石内部剪应力的作用下,上盘断面附近往往形成多组剪切节理及裂隙破碎带,当有补给来源时可形成地下含水带;二是在挤压作用下,下盘断面附近往往形成断层泥密实带,当与地表覆盖层组合遇地下水时,即可形成阻水隔水岩层。根据一般地下水的形成机理和找水经验尤其是地热水的找水经验,F2 逆冲活动断层附近,形成含水、阻水热储及盖层结构的可能性比较大,当遇深部对流型地热水时将会形成带状热水资源^[33]。类比基本相似的条件,安宁仁寿山附近实施的 RSDR 孔,地处兰州断陷盆地的西北边缘,距离金城关断裂(F1)仅约 300 m,从盆地层状热储分析热储条件一般或较差,但实际勘探井的承压水头、井口水温、涌水量是盆地内已有的 8 口井中指标最好的(或之一),说明该地段的地热水条件不仅与盆地层状成因相关,更与 F1 断裂带状热储相关。

(2) 地下热水的补给来源

断裂带状地下水的形成,一般来源有大气降水补给、含水层的侧向径流补给和补给途径较远、循环路径较长的深部水的补给等。石佛沟景区地段,上述地

下水的补给方式都有可能存在,因此,宋家沟一直沟门断裂(F2)带具备形成带状地下热水的基本条件。

5 结论及建议

(1) 根据兰州断陷盆地地热地质条件和热储含水层富水性,可以 F5、F8 隐伏断裂为界,将断陷盆地分为西部西固城区、中部七里河区、东部城关—石佛沟区 3 个区。西固城区地热水含水层富水性中等,单位涌水量较小,热储水温 40~70 °C;中部富水性丰富,单位涌水量较大,热储水温 60~70 °C;东部北段含水层富水性较弱,单位涌水量一般较小,热储水温 30~40 °C。

(2) 平面上由西向东不同深度的地热温度呈增加趋势,垂向上 2 000~2 500 m 深度的地热增温率升高,推断是兰州断陷盆地地热开采的基本深度。

(3) 石佛沟景区地下热水潜力地段潜在层状传导型地热和断裂带状地热资源。层状地下热水赋存于兰州断陷盆地南部边缘地段,热储顶面埋深大于 800 m,热储层厚度大于 1 000 m。断裂带状地下热水赋存于 F2 断裂破碎带或 F2 与 F8 断裂的交汇地段,推测热储顶面埋藏深度 500~600 m 或更深,热储层厚度一般与断裂破碎带在垂直方向的视厚度一致,推断一般为数十米。根据类似经验,推断在石佛沟景区可能存在层状和带状的“复合型”地下热水的富集地段。

综上所述,建议断裂带状热储层的地热水勘探开采井成井深度可按 800~1 100 m 考虑;“复合型”盆地层状热储层的勘探开采井深度可按 1 500~2 000 m 考虑。该地段预测地热水井口出水温度可达 50~60 °C,单井涌水量可达 500~1 000 m³/d,热水水质可达到医疗洗浴质量标准。

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 Guiling, ZHANG Wei, LIANG Jiyun, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38(4): 449 - 459. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 张萌,蔺文静,刘昭,等. 西藏谷露高温地热系统水文地球化学特征及成因模式 [J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(3): 382 - 392. [ZHANG Meng, LIN Wenjing, LIU Zhao, et al. Hydrogeochemical

- characteristics and genetic model of Gulu high-temperature geothermal system in Tibet, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(3): 382 - 392. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 章旭, 郝红兵, 刘康林, 等. 西藏沃卡地堑地下热水水文地球化学特征及其形成机制 [J]. 中国地质, 2020, 47(6): 1702 - 1714. [ZHANG Xu, HAO Hongbing, LIU Kanglin, et al. Hydrogeochemical characteristics and genetic model of Oiga Graben geothermal waters system in Tibet[J]. Geology in China, 2020, 47(6): 1702 - 1714. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 邹俊, 武斌, 马昭雄, 等. 西藏谢通门县卡嘎地热成因与资源潜力分析 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 207 - 216. [ZOU Jun, WU Bin, MA Zhaoxiong, et al. Geothermal genesis and resource potential of Kaga in Xietongmen County in Tibet[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 207 - 216. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 上官志冠. 腾冲热海地热田热储结构与岩浆热源的溫度 [J]. 岩石学报, 2000, 16(1): 83 - 90. [SHANGGUAN Zhiguan. Structure of geothermal reservoirs and the temperature of mantle derived magma hot source in the Rehai area, Tengchong[J]. Acta Petrologica Sinica, 2000, 16(1): 83 - 90. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 李洁祥, 郭清海, 王焰新. 高温热田深部母地热流体的溫度计算及其升流后经历的冷却过程: 以腾冲热海热田为例 [J]. 地球科学, 2015, 40(9): 1576 - 1584. [LI Jiexiang, GUO Qinghai, WANG Yanxin. Evaluation of temperature of parent geothermal fluid and its cooling processes during ascent to surface: A case study in rehai geothermal field, Tengchong[J]. Earth Science, 2015, 40(9): 1576 - 1584. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 卞跃跃, 赵丹. 四川康定地热田地下热水成因研究 [J]. 地球学报, 2018, 39(4): 491 - 497. [BIAN Yueyue, ZHAO Dan. Genesis of geothermal waters in the Kangding geothermal field, Sichuan Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2018, 39(4): 491 - 497. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 张薇, 王贵玲, 赵佳怡, 等. 四川西部中高温地热流体地球化学特征及其地质意义 [J]. 现代地质, 2021, 35(1): 188 - 198. [ZHANG Wei, WANG Guiling, ZHAO Jiayi, et al. Geochemical characteristics of medium-high temperature geothermal fluids in West Sichuan and their geological implications[J]. Geoscience, 2021, 35(1): 188 - 198. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 孙东, 李金玺, 曹楠, 等. 四川盆地地热地质条件及勘探潜力评价 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 193 - 206. [SUN Dong, LI Jinxi, CAO Nan, et al. A preliminary study of the geothermal geological characteristics and exploration potential of the Sichuan Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 193 - 206. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 史杰, 乃尉华, 李明, 等. 新疆曲曼高温地热田水文地球化学特征研究 [J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(3): 165 - 172. [SHI Jie, NAI Weihua, LI Ming, et al. Hydrogeochemical characteristics of high temperature geothermal field of the Quman geothermal field in Xinjiang[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45(3): 165 - 172. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 史杰, 汪美华, 马小军, 等. 新疆塔什库尔干县曲曼地热田地下水同位素研究 [J]. 地球学报, 2022, 43(5): 645 - 653. [SHI Jie, WANG Meihua, MA Xiaojun, et al. Isotope and hydrogeochemical characteristics of the quman high temperature geothermal field in taxkorgan, Xinjiang[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2022, 43(5): 645 - 653. (in Chinese with English abstract)]
- [12] ZHANG Ying, LUO Jun, FENG Jianyun. Characteristics of geothermal reservoirs and utilization of geothermal resources in the southeastern coastal areas of China[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2020, 8(2): 134 - 142.
- [13] 邢一飞, 王慧群, 李捷, 等. 雄安新区地热水的化学场特征及影响因素分析 [J]. 中国地质, 2022, 49(6): 1711 - 1722. [XING Yifei, WANG Huiqun, LI Jie, et al. Chemical field of geothermal water in Xiong'an New Area and analysis of influencing factors[J]. Geology in China, 2022, 49(6): 1711 - 1722. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 王婷灏, 汪新伟, 毛翔, 等. 沧县隆起北部地区地热资源特征及开发潜力 [J]. 中国地质, 2022, 49(6): 1747 - 1764. [WANG Tinghao, WANG Xinwei, MAO Xiang, et al. Characteristics and development potential of geothermal resources in northern Cangxian uplift[J]. Geology in China, 2022, 49(6): 1747 - 1764. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 徐一鸣, 郝文辉, 方士琦, 等. 河北四家地热异常特征

- 及其成因[J].地质通报,2022,41(5):873-885. [XU Yiming, HAO Wenhui, FANG Shiqi, et al. Characteristics and origin of the geothermal anomaly in Sijia, Hebei Province[J]. Geological Bulletin of China, 2022, 41(5): 873-885. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 虎新军,陈晓晶,仵阳,等.综合地球物理技术在银川盆地东缘地热研究中的应用[J].物探与化探,2022,46(4):845-853. [HU Xinjun, CHEN Xiaojing, WU Yang, et al. Application of comprehensive geophysical exploration in geothermal resources on the eastern margin of Yinchuan Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(4): 845-853. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 安百州,曾昭发,闫照涛,等.鄂尔多斯盆地西缘热储构造模式及地热资源分布特征[J].吉林大学学报(地球科学版),2022,52(4):1286-1301. [AN Baizhou, ZENG Zhaofa, YAN Zhaotao, et al. Thermal reservoir construction mode and distribution characteristics of geothermal resources in the western margin of Ordos Basin[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2022, 52(4): 1286-1301. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 郑克桢,潘小平.中国地热勘查开发100例[C]//俞有峰,施孝,李百祥,等.兰州市城区地热资源勘查.北京:地质出版社,2005. [ZHENG Keyan, PAN Xiaoping. 100 examples of geothermal exploration & development in China[C]//YU Youfeng, SHI Xiao, LI Baixiang, et al. Geothermal exploration in Lanzhou city. Beijing: Geology Press, 2005. (in Chinese)]
- [19] 魏林森,张凌鹏,王婷,等.兰州市城区地热地质条件及资源开发潜力分析[J].中国地质调查,2018,5(2):45-50. [WEI Linsen, ZHANG Lingpeng, WANG Ting, et al. Analysis of geothermal geological conditions and resources exploitation potential in Lanzhou City[J]. Geological Survey of China, 2018, 5(2): 45-50. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 马宝强,张凌鹏,范斌,等.兰州市区地热水地球化学特征分析[J].干旱区资源与环境,2019,33(9):125-132. [MA Baoqiang, ZHANG Lingpeng, FAN Bin, et al. Analysis of geochemical characteristics of geothermal water in Lanzhou city[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(9): 125-132. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 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. [SUN Haichuan. Analysis on geothermal geological conditions of dinosaur park block in the west of Lanzhou new district[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(6): 1411-1418. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 李百祥,王金华.从榆中盆地综合物探勘查信息探讨地热资源开发靶区优选[J].甘肃地质,2013,22(1):48-54. [LI Baixiang, WANG Jinhua. Optimization of target for geothermal resource development by comprehensive geophysical prospecting results in Yuzhong Basin[J]. Gansu Geology, 2013, 22(1): 48-54. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 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应用与热储分析[J].西北地质,2004,37(2):83-89. [LI Baixiang, TENG Hanren, HAO Linfeng. Application of regional gravitation in the geothermal exploration and analysis of geothermal reserves in Lanzhou fault basin[J]. Northwestern Geology, 2004, 37(2): 83-89. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 冯亚忠,王志林,李百祥.兰州断陷盆地地热资源勘查与热储分析[J].甘肃地质学报,2004,13(1):80-86. [FENG Yazhong, WANG Zhilin, LI Baixiang. Exploring geothermal resources and analysis of geothermal reservoir in Lanzhou fault basin[J]. Acta Geologica Gansu, 2004, 13(1): 80-86. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 魏林森,张凌鹏,范斌,等.兰州市城区地热资源勘查报告[R].兰州:甘肃省地质矿产勘查开发局第二地质矿产勘查院,2016. [WEI Linsen, ZHANG Linpeng, FANG Bin, et al. Exploration report on geothermal resources in the area of Lanzhou city, Gansu province [R]. Lanzhou: NO. 2 Institute of Gansu geological and mineral exploration and development bureau, 2016. (in Chinese)]
- [26] 魏林森,谢志锋,张凌鹏,等.甘肃省兰州市中心城区地热资源普查报告[R].兰州:甘肃省地质矿产勘查开发局第二地质矿产勘查院,2020. [WEI Linsen, XIE Zhifeng, ZHANG Linpeng, et al. Survey report on geothermal resources in the downtown area of Lanzhou city, Gansu province[R]. Lanzhou: NO. 2 Institute of Gansu geological and mineral exploration and development bureau, 2020. (in Chinese)]
- [27] 张健,冯旭亮,岳想平.综合物探方法在隐伏岩溶探测中的应用[J].物探与化探,2022,46(6):1403-

1410. [ZHANG Jian, FENG Xuliang, YUE Xiangping. Application of comprehensive geophysical prospecting method in detecting concealed karst collapses[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(6): 1403 – 1410. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 任小庆, 余鸿, 罗娜宁, 等. CSAMT 法在福建省惠安地热勘查中的应用 [J]. 现代地质, 2022, 36(2): 515 – 523. [REN Xiaoqing, YU Hong, LUO Naning, et al. Application of CSAMT in geothermal exploration in Hui'an, Fujian Province[J]. Geoscience, 2022, 36(2): 515 – 523. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 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 Haichuan. Application of CSAMT and MT in geothermal exploration in Lanzhou New District[J]. Ground Water, 2020, 42(1): 24 – 27. (in Chinese with English abstract)]
- [30] 罗卫锋, 胡志方, 张家强, 等. CSAMT 和测井联合约束反演在松辽盆地东南隆起区油页岩识别中的应用 [J/OL]. 地质通报, (2022-09-30) [2023-05-20]. [LUO Weifeng, HU Zhifang, ZHANG Jiaqiang, et al. Application of CSAMT and logging combined constrained inversion in oil shale identification in the Southeast Uplift Area of Songliao Basin[J/OL]. Geological Bulletin in China, (2022-09-30) [2023-05-20] (in Chinese with English abstract)]
- [31] 毛小平, 汪新伟, 李克文, 等. 地热田热量来源及形成主控因素 [J]. 地球科学, 2018, 43(11): 4256 – 4266. [MAO Xiaoping, WANG Xinwei, LI Kewen, et al. Sources of heat and control factors in geothermal field[J]. Earth Science, 2018, 43(11): 4256 – 4266. (in Chinese with English abstract)]
- [32] 孟甲, 秦鹏, 史启朋, 等. 断陷盆地碳酸盐岩热储勘查及研究: 以鱼台凹陷为例 [J]. 地质科技通报, 2022, 41(4): 38 – 45. [MENG Jia, QIN Peng, SHI Qipeng, et al. Exploration and study on carbonate thermal reservoirs in fault basins: A case study from Yutai Sag[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2022, 41(4): 38 – 45. (in Chinese with English abstract)]
- [33] 汪新伟, 王婷灏, 李海泉, 等. 太原盆地岩溶地热系统的形成演化及其地热资源潜力 [J]. 中国地质, 2022, 49(3): 716 – 731. [WANG Xinwei, WANG Tinghao, LI Haiquan, et al. Evolution of Karst geothermal system and its geothermal resource potential in Taiyuan Basin[J]. Geology in China, 2022, 49(3): 716 – 731. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华
刘真真