

阳高—天镇地区高温地热系统形成机制及资源开发前景研究

何亚东, 贾小丰, 张自宾, 宋 健, 郭 靖, 刘培森, 张森琦, 段江飞

A study of the formation mechanism and resource development prospect of the high-temperature geothermal system in the Yanggao-Tianzhen area

HE Yadong, JIA Xiaofeng, ZHANG Zibin, SONG Jian, GUO Jing, LIU Peisen, ZHANG Senqi, and DUAN Jiangfei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202302065>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

涡轮取芯钻进工艺在干热岩钻井中的应用

A study of the application of turbine coring drilling technology to hot dry rock drilling

谭现锋, 王景广, 赵长亮, 王稳石, 翁炜, 段隆臣 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 195–202

井筒自循环技术开采干热岩地热的试验研究

Experimental study on influence factors of wellbore self-circulation mining hot dry rocks

亓兆伟, 闫方平, 傅大庆, 邱建强 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 198–208

川藏公路102滑坡后缘平台物质特征及其形成机制新思考

New thoughts on the material characteristics and formation mechanism of the platform at the back edge of the 102 Landslide on the Sichuan—Tibet Highway

杨德宏, 武博强, 黄勇, 陈兴强 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 133–140

共和盆地干热岩体人工裂隙带结构的控热机理与产能优化

Heat control mechanism and productivity optimization of artificial fracture zone structure of dry hot rock in Gonghe Basin

陈炫沂, 姜振蛟, 徐含英, 冯波 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 191–199

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

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.1000-3665.202302065

何亚东, 贾小丰, 张自宾, 等. 阳高—天镇地区高温地热系统形成机制及资源开发前景研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(4): 39-49.

HE Yadong, JIA Xiaofeng, ZHANG Zibin, *et al.* A study of the formation mechanism and resource development prospect of the high-temperature geothermal system in the Yanggao-Tianzhen area[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(4): 39-49.

阳高—天镇地区高温地热系统形成机制及 资源开发前景研究

何亚东¹, 贾小丰², 张自宾¹, 宋 健², 郭 靖³, 刘培森¹, 张森琦², 段江飞⁴

(1. 晋能控股煤业集团有限公司, 山西 大同 037000; 2. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051; 3. 中国冶金地质总局第三地质勘查院, 山西 太原 030000; 4. 中国煤炭地质总局水文地质工程地质环境地质勘查院, 河北 邯郸 056000)

摘要:“双碳”背景下, 山西省持续深入推进清洁能源发展, 2020 年 3 月在大同天镇县水桶寺村附近探获高温高压地热流体。为探究大同阳高—天镇地区高温地热系统及成因机制, 选择阳高孤山村—平山村一带 20 km² 的范围作为重点研究区, 采用地质调查、地球物理、钻探、测井等手段查明研究区地热赋存条件和规律。研究结果表明: (1) 阳高—天镇地区的地热资源主要赋存于太古界变质岩及断裂带含水岩组中, 直接热源可能为中上地壳未冷却的岩浆囊, 盖层为第四系堆积物、新近系和古近系砂砾石层。(2) 该地区高温地热系统为对流、传导型地热系统: 一方面大气降水、地表水经孔隙渗透作用及断层裂隙通道下渗至热储位置受热形成热水, 随后沿断裂通道对流上升至浅地表出露成温泉; 另一方面新生代以来持续的伸展拉张环境, 导致软流圈上涌, 上地幔部分熔融形成的基性玄武岩浆经深部断裂通道上升至中上地壳形成多个岩浆囊, 热量通过断裂或高热导率值的太古界变质岩传递至浅地表形成地热异常。(3) YG-1 井抽水试验结果显示, 该地区水热型地热资源以静储量为主, 开发利用应考虑采用无干扰换热技术。综合分析区域地质条件, 结合物探、钻探成果, 认为该地区深部可能存在干热岩型地热资源, 有待进一步查证。

关键词: 阳高—天镇; 大同盆地; 高温地热系统; 形成机制; 干热岩

中图分类号: P314

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)04-0039-11

A study of the formation mechanism and resource development prospect of the high-temperature geothermal system in the Yanggao-Tianzhen area

HE Yadong¹, JIA Xiaofeng², ZHANG Zibin¹, SONG Jian², GUO Jing³, LIU Peisen¹,
ZHANG Senqi², DUAN Jiangfei⁴

(1. Jinneng Holding Coal Group Co. Ltd., Datong, Shanxi 037000, China; 2. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey, China Geological Survey, Baoding, Hebei 071051, China; 3. The Third Geological Exploration Institute of China Metallurgical Geology Bureau, Taiyuan, Shanxi 030000, China; 4. Institute of Hydrogeology, Engineering Geology, Environmental Geology, General Administration of Coal Geology of China, Handan, Hebei 056000, China)

收稿日期: 2023-02-27; 修订日期: 2023-04-23

投稿网址: www.swdzcgdz.com

第一作者: 何亚东(1989-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事区域地质及地热地质相关研究。E-mail: hyd.310@163.com

通讯作者: 贾小丰(1982-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地热(干热岩)资源调查评价及二氧化碳地质储存潜力评价相关研究。

E-mail: jiaxiaofeng@mail.cgs.gov.cn

Abstract: Under the background of “dual carbon”, Shanxi Province continues to promote the development of clean energy. In March 2020, high-temperature and high-pressure geothermal fluid was discovered near the Shuitongsi Village in Tianzhen County in Datong. In order to explore the high temperature geothermal system and its genetic mechanism in the Yanggao-Tianzhen area in Datong, an area of 20km² in the Gushan Village-Pingshan Village of Yanggao County is selected as the key research area. Geological survey, geophysics, drilling, logging and other methods are used to find out the occurrence conditions and rules of geothermal energy in the study area. The results show that (1) the geothermal resources in the Yanggao-Tianzhen area are mainly hosted in the Archean metamorphic rocks and water-bearing formations in fault zones. The direct heat source may be from the uncooled magma chamber in the middle and upper crust, and the caprocks are the Quaternary accumulation, Neogene and Paleogene gravel layer. (2) The high-temperature geothermal system in this area is the convection and conduction geothermal system. On the one hand, atmospheric precipitation and surface water may infiltrate into the geothermal reservoir through pores and fault-fissure channels to form hot water. Then, it ascends to the shallow surface by convection along the fault-channels and forms a hot spring. On the other hand, the continuous extensional environment since the Cenozoic has led to the upwelling of the asthenosphere. The basaltic magma formed by partial melting of the upper mantle rises to the middle and upper crust through deep fault channels to form multiple magma pockets. Heat is transferred to the shallow surface through faults or Archean metamorphic rocks with high thermal conductivity to form geothermal anomalies. (3) The pumping test results of the YG-1 well show that, hydrothermal geothermal resources in this area are mainly static reserves, and non-interference heat exchange technology should be considered for the development and utilization. Through a comprehensive analysis of regional geological conditions, combined with geophysical prospecting and drilling results, it is believed that there may be dry-hot rock geothermal resources in the deep part of the region, which needs further investigation.

Keywords: Yanggao-Tianzhen; Datong Basin; high-temperature geothermal system; formation mechanism; hot dry rock

山西省地热资源总量丰富,空间分布相对集中,主要分布于太原—晋中、大同—朔州、忻州、长治—晋城、吕梁—临汾西及临汾东—运城 6 大片区^[1]。据相关资料统计,山西省地热流体(3 000 m 以浅)总储量 2.970×10^{12} m³, 地热资源总热量为 1.769×10^{18} kJ, 总热量相当于 603.588 亿 t 标准煤; 地热资源可开采总热量为 2.740×10^{17} kJ, 折合标准煤 93.5 亿 t^[1]。研究发现我国沉积盆地地热资源约占可开发利用水热型地热资源的 89%^[2]。大同盆地处于山西省北部, 2020 年 3 月, 山西省地质勘查局第一水文地质队在大同天镇县水桶寺村附近施工的 DR1 地热勘探井探获高温高压地热流体, 孔口温度 160.2 °C, 单井流量 230 m³/h, 成为我国中东部地区发现的温度最高、自流量最大的地热井, 引起了国内外众多专家学者的高度关注^[3-6]。

大同阳高—天镇地区地热勘查工作始于 20 世纪 90 年代, 1991 年、1993 年山西省地矿局环境地质总站在天镇县马圈库、阳高县孤山庙一带进行了地热普查工作, 之后几十年又有多家单位陆续在该区域开展了地质调查、物探、测井等相关地热勘查工作^[4], 初步圈

定了地热田范围, 但对于地热田模式、热储类型、成因机制等尚缺乏系统深入的研究。阳高县孤山庙地热田紧邻天镇县马圈库地热田, 整体勘探程度不足, 仅有部分浅井资料, 2009 年在阳高平山村西探获 1 眼深 178 m, 出水温度 104 °C 的地热井^[7], 是否存在类似天镇县 DR1 井探获的高温地热资源, 需进一步勘查研究。

为此, 本文选择阳高县孤山村—平山村一带 20 km² 的范围作为重点研究区, 通过分析区域地质背景及相关地质调查、物探勘查、钻探成果资料, 围绕水源、热源、热储、盖层、传导机制等关键问题, 探讨阳高—天镇地区地热系统及形成机制, 并提出资源开发利用建议, 以期为进一步推进山西晋北地区地热开发利用工作提供参考依据。

1 研究区地质背景

1.1 地质背景

研究区位于山西省阳高县以北 4 km, 地处阳高—天镇盆地, 是大同盆地东北部的一个次级盆地, 整体呈 NEE 向展布, 地质构造上属于华北板块北缘活动带

的阳高—天镇块凸^[8]。大同盆地为新生代断陷盆地, 位于华北克拉通中部, 华北地块中部带与内蒙古缝合带的交汇处, 自晚中生代以来经历了多期构造运动, 发生岩石圈局部改造和减薄^[9-11]。新生代以继承性断裂活动为主, 在伸展拉张构造环境下, 控盆边界断裂不断向盆地方向滑落, 发育成为一系列呈阶梯状展布的张性正断层, 构成地堑与半地堑, 与盆缘主控断裂一起控制形成 NE—SW 向展布的箕状断陷盆地。

盆地内构造以断裂为主, 褶皱次之, 主构造方向为 NE 向, 主边界断裂如图 1 所示: 口泉山断裂(F1)走向 NNE 向, 六棱山断裂(F2)、恒山断裂(F3)、云门山断裂(F4)、熊耳山北缘断裂(F5)、熊耳山南缘断裂(F6)、小五台山断裂(F7)走向均表现为 NEE 向, 同时该地区还发育有隐伏断裂^[9, 11]。

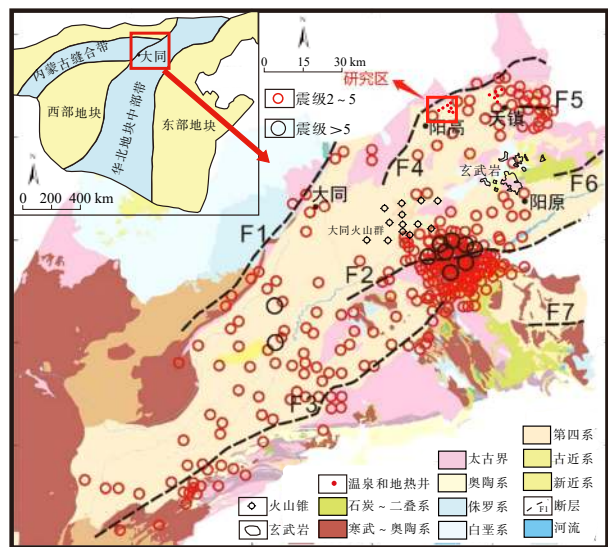


图 1 大同盆地地震分布图 (据文献 [21-22] 修改)

Fig. 1 Seismic distribution map of the Datong Basin (modified after Ref. [21-22])

大同盆地由老至新发育新太古界、古元古界变质岩地层, 寒武系、奥陶系碳酸盐岩地层, 石炭系、二叠系碎屑岩含煤地层, 侏罗系和白垩系碎屑岩含煤地层, 古近系、新近系、第四系等松散堆积物, 砂砾石层及基性火山岩地层^[12]。

1.2 地热地质背景

大同盆地由山西高原演化而来, 是大陆岩石圈伸展破裂区。第四纪以来, 受新构造运动的影响, 盆地内出现一系列火山喷发和岩浆溢出, 从早更新世末期约 0.78 Ma 开始, 至晚更新世早期约 0.1 Ma 结束, 前后共经历 3 期火山运动。岩石圈在伸展拉张应力作用下减薄, 软流圈物质上涌, 上地幔物质部分熔融, 岩浆

沿深大断裂及构造薄弱带上涌, 喷出或溢流至地表引发火山活动, 形成著名的大同火山群^[9, 13]。火山主要分布在盆地周边及盆地南部, 集中在深大断裂附近, 而盆地的东北部阳高—天镇一带火山岩出露较少, 推测该区域为岩浆侵入区, 深部有岩浆囊或高温异常体, 可能是一个良好的热源汇聚区。

地震成像揭示大同火山群下方存在广泛的低速异常, 可由中地壳、下地壳一直追溯到上地幔大于 200 km 的深度^[14-15], 大地电磁研究表明中地壳导体可能为地壳岩浆体^[16], 高分辨率三维速度模型揭示大同火山群下方中地壳 (10~20 km) 存在岩浆房^[13, 16]。软流圈上升, 对岩石圈造成热侵蚀, 上地幔部分熔融形成的基性岩浆沿深大断裂迁移, 最终汇聚在大同火山下方 10~20 km 深的中地壳岩浆房, 显示为低速异常。阳高—天镇地区二维地震数据反演显示, 中地壳和上地壳存在低速异常, 在地下 6~20 km 可能存在大同火山群喷发后未冷却的岩浆房, 地热资源通过深大断裂传递, 在地表以温泉形式呈现^[17-20]。

此外大同盆地中小地震频繁发生, 地震集中在盆地边界断层附近, 基本为 10 km 左右的浅层地震^[21-22]。其中 5 级以上地震主要集中于 F2 断层中部附近, 5 级以下地震主要位于阳高—天镇地震区、F2 和 F5 断层附近, 如图 1 所示。地震活动与地热资源的分布具有相似性, 地震活动对地热资源的赋存区域有一定的指向性, 一般情况下地震与地热资源相伴而生^[23]。而且研究区大地热流值 (75.3~79.5 mW/m²) 远大于周围山区 (37.7~46.1 mW/m²), 高于平均地面热流值 50~65 mW/m²^[24-25]。以上均表明研究区具有良好的地热背景。

2 调查方法

开展野外地质调查、二维地震、可控源大地电磁测深 (CSAMT) 及钻探工程以查明研究区地质、构造及热源、热储、盖层特征。二维地震测线、CSAMT 测线及 YG-1 地热勘探井位置, 如图 2 所示。钻探工程结束后, 进行抽水试验、静稳态测温、岩矿测试等, 获取地热流体参数、地温梯度、热储岩石参数等, 并计算研究区大地热流值。

3 勘查成果

3.1 地质调查成果

野外地质调查成果揭示, 研究区地层主要为新太古界阳高表壳岩、新近系和第四系。阳高表壳岩主要

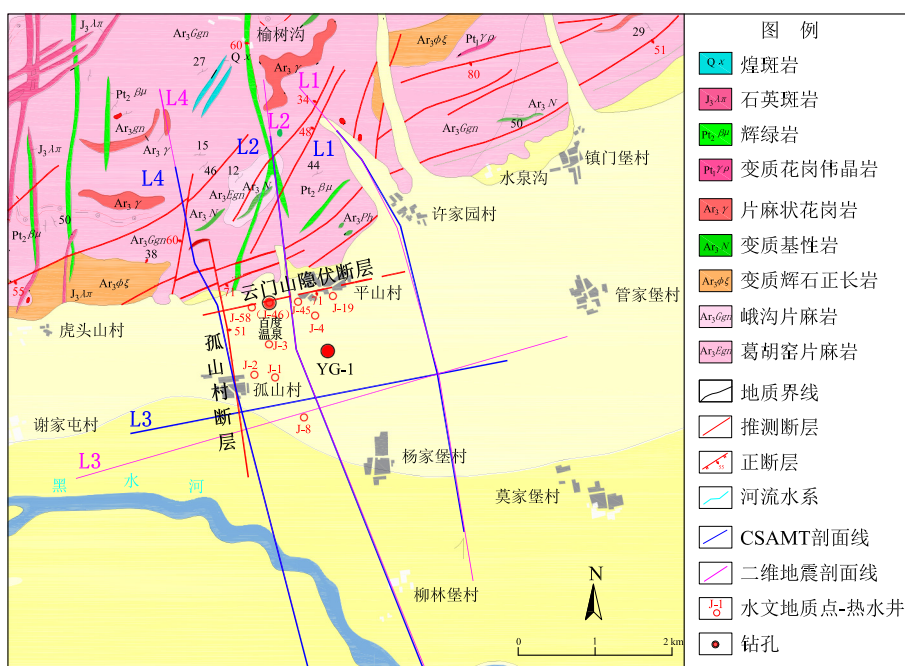


图 2 二维地震与 CSAMT 测线布置图

Fig. 2 2D seismic and CSAMT line layout

分布于北部山区,岩性较为复杂,以磁铁石英岩、二辉片麻岩、斜长角闪岩等变质岩为主,又广泛发育新太古代至新生代侵入岩。新近系和第四系主要分布于南部盆地区,以砂砾石夹砂土及松散堆积物为主,厚 0 ~ 300 m,向盆地方向逐渐增厚。

研究区北部云门山山前发育一条宽 1 000 m 左右的 NEE 向断裂带,该断裂带由多条平行高角度正断层组合而成,推测主断层隐伏于山麓第四系之下,断层总体向盆地方向倾斜,倾角一般大于 70°,断距较大,断层作用导致山体向盆地方向呈现阶梯状下降,山前形成三角面或孤立的山头(图 3)。

调查发现孤山村房屋北墙体普遍发育垂直裂缝,裂缝房屋呈南北向排布;平山村房屋东西侧墙体普遍发育斜裂缝,裂缝房屋呈东西向排布(图 4)。据此推断孤山村下部存在隐伏的 NNW 向正断层,该断层倾向 NEE;平山村下部存在隐伏的 NEE 向断层,该断层应为云门山断裂带的一部分。房屋墙体裂缝的证据表明该区域构造至今仍处于活动中。

3.2 二维地震及 CSAMT 反演特征

二维地震 L1、L2、L4 剖面反应的地质特征较为一致(图 5): (1)浅部 300 m 左右明显的反射波界面,解释为第四系与新近系、古近系不整合面;1 600 m 左右较为明显的反射波界面解释为太古代阳高表壳岩与新生界沉积物不整合面。(2)L1、L2 剖面显示第四系强振幅较连续反射地层突然中断,这一中断点为云



(a) 山体阶梯状下降



(b) 断层产状



(c) 断层三角面

图 3 云门山断裂带

Fig. 3 Yunmenshan fault zone

门山前断裂 F4 的上确定点, L4 剖面显示新近系、古近系地层与相接的阳高表壳岩地层之间的反射波界面,且由南向北尖灭,尖灭点为 F4 断裂的下确定点。(3)L3 剖面显示在深度 1 600 ~ 1 700 m 范围存在一处较为明显的反射波界面,认为该界面为阳高表壳岩与上覆新近系地层及变质岩热蚀变层的分界面,且反射波界面有明显错断,解释为倾向 NEE 的孤山村正断层,倾角 51°,这符合以 NE 向挤压走滑为主的华北区

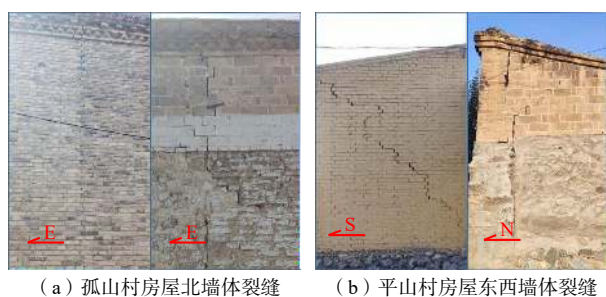


图 4 房屋裂缝

Fig. 4 House cracks

域性构造应力场^[26-27], 印证了大同盆地的形成可能受到了太平洋—欧亚板块碰撞板缘动力作用的影响。

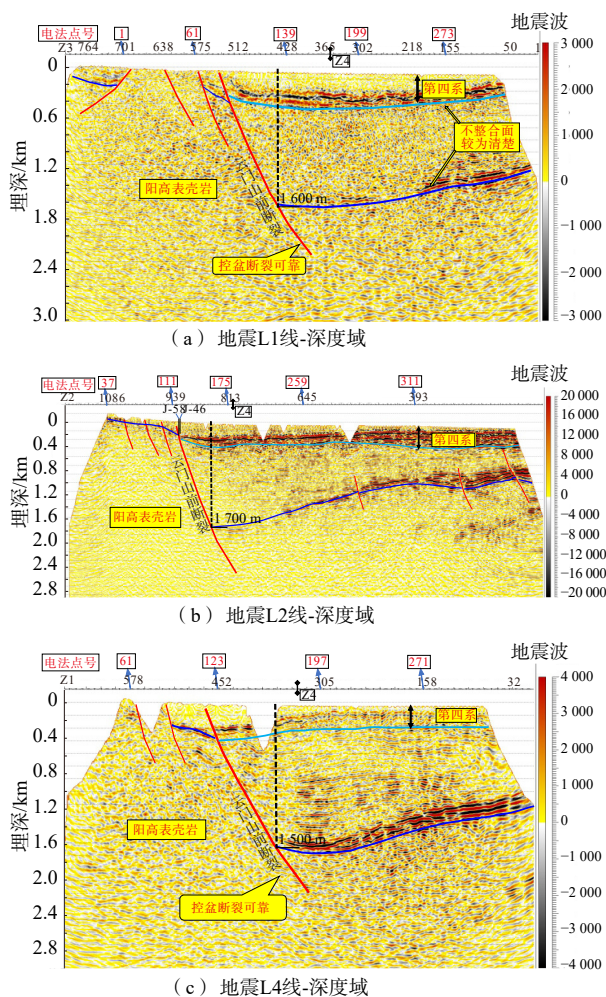


图 5 二维地震反演解释剖面图

Fig. 5 2D seismic inversion interpretation profile

CSAMT 剖面及二维反演特征显示(图 6、图 7)显示: (1)阳高—天镇盆地具有典型的“箕”状断陷盆地特征; (2)剖面北部及盆地深部的高电阻区为新太古界阳高表壳岩, 浅部 0~260 m 低—中高阻区为第四系覆盖层, 中部低阻区为古近系、新近系砂砾石层及蚀变层; (3)北部高阻区与中低阻区分界面为云门山前

隐伏断裂, 倾角约 70°, 切割深度大, 向盆地内部可能发育次级隐伏断裂; (4)L2 剖面的 S1、S2、S3 中低阻区可能为流体活动导致。

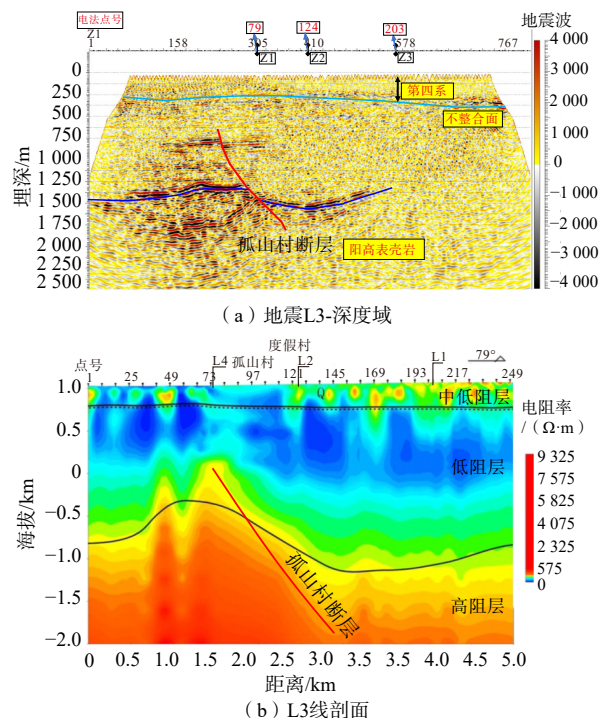


图 6 L3 测线二维地震和 CSAMT 成果解释剖面图

Fig. 6 Interpretation profile of the L3 line 2D seismic and CSAMT results

以上二维地震和 CSAMT 成果契合度较高, 所显示的地质特征与研究区区域地质特征基本一致。

3.3 YG-1 井综合地质成果

基于研究区地质调查资料及物探成果, 在平山村以南 750 m 处布设一眼地热勘探井 YG-1(图 2), 钻孔深 2 682 m, 自上而下揭露地层分别为第四系黄土层、砂砾石层, 新近系、古近系砾岩、砂砾岩、含砾粗砂岩, 新太古界二长浅粒岩、辉石斜长片麻岩、二长片麻岩, 局部夹花岗岩脉体(图 8)。

地球物理测井资料显示, 在 2 000~2 520 m 段有明显的低电阻率、高声波时差特性, 二维地震和 CSAMT 成果显示钻孔将在 2 000 m 附近揭露云门山山前断裂, 且该段钻进过程中钻速不稳定, 在 2 064 m 处发生一次卡钻事故, 分析认为该段为断层破碎带。但在钻进过程中泥浆消耗量不明显, 推测钻孔附近云门山山前断层裂隙闭合性较好, 或被热蚀变矿物充填。

据钻孔静稳态测温资料(图 9), 孔底温度 140.33 °C, 全井段平均地层增温率为 5.03 °C/100 m, 其中 200~1 600 m 段地层增温率为 6.05 °C/100 m, 主要原因可能

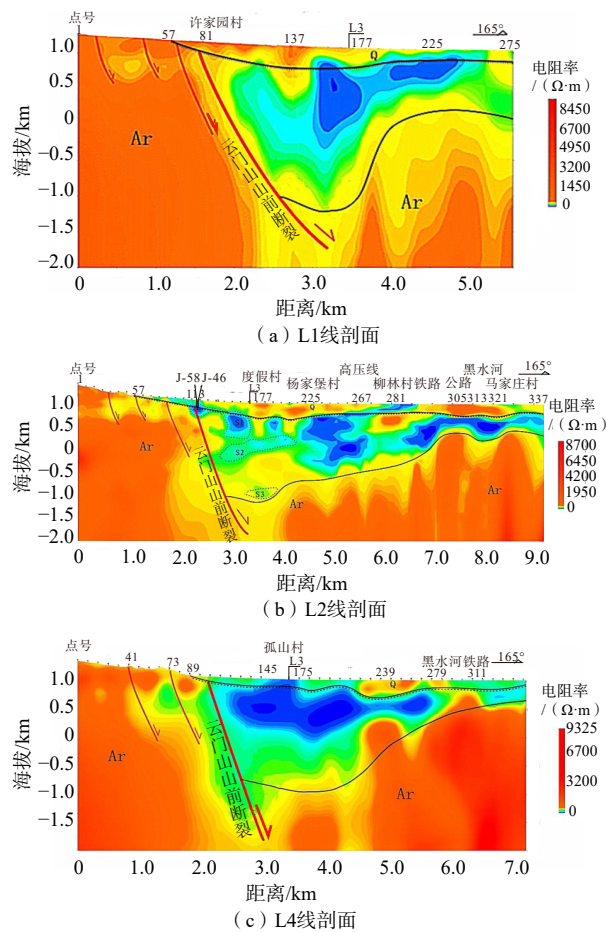


图 7 CSAMT 成果解释剖面图

Fig. 7 CSAMT results interpretation profile

为深部高温流体沿断裂带上升,在第四系、新近系、古近系的孔渗性相对较好的层位形成一个温度较高的层带,越靠近断裂带增温率越高,远离断裂带增温率会降低;1 600~2 020 m、2 330~2 510 m 段地层增温率明显下降,分别为 2.09 °C/100 m、1.68 °C/100 m,推测可能为深循环低温水沿阳高表壳岩不整合面和断裂破碎带活动产生热对流所致;2 020~2 330 m 段,地层增温率为 5.86 °C/100 m,2 510~2 660 m 段,地层增温率为 5.20 °C/100 m,表现为正常变质岩热储地温梯度。

为了获取钻孔及附近区域大地热流值,测得孔深 1 915 m 处的片麻岩样品热导率值为 1.540 8 W/(m·°C),按照 Sass 等^[28]通过试验得出的经验公式进行温度校正,公式如下:

$$q = -K_r(dT/dz)$$

式中: q ——大地热流值($\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$);

K_r ——岩石热导率($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{°C}^{-1}$);

dT/dz ——地温梯度($\text{°C} \cdot \text{km}^{-1}$);

负号表示热流传导的方向^[29]。

地层单位		柱状	时代	岩石名称	深度 /m	厚度 /m
界	系					
新 生 界	第四系		Q	砂质黏土	7.60	7.60
			Q	砂砾岩	310.00	302.40
	新近系		N	砂砾岩	585.00	282.60
			N	含砾粗砂岩	595.00	10.00
			N	砂砾岩	955.00	460.00
			N	含砂粗砾岩	995.00	40.00
	古近系		N	砂砾岩	1 005.00	10.00
			E	含砾粗砂岩	1 600.00	595.00
			Ar	二长浅粒岩	1 875.00	275.00
			Ar	辉石斜长片麻岩	2 505.00	630.00
太 古 界	新太古界		Ar	二长片麻岩	2 682.00	177.00

图 8 YG-1 井钻孔柱状简图

Fig. 8 Borehole column diagram of well YG-1

选取 2 020~2 330 m 段、2 510~2 660 m 段地温梯度进行加权平均,计算得出该片麻岩段的大地热流值为 97.0 mW/m^2 ,考虑该地热井第四系、新近系、古近系及太古界段内均呈现以传导型为主的地温特征,以此估算 YG-1 井及附近区域大地热流值较为可靠。

YG-1 井共进行 3 次抽水试验,第一次常规抽水试验降深 273 m,稳定抽水 24 h 后测得出水温度 81 °C,单位涌水量为 0.005 6 L/(s·m);第二次大降深抽水试验降深 879 m,稳定抽水 29 h 后测得出水温度 101 °C,单位涌水量为 0.004 5 L/(s·m);第三次大降深抽水试

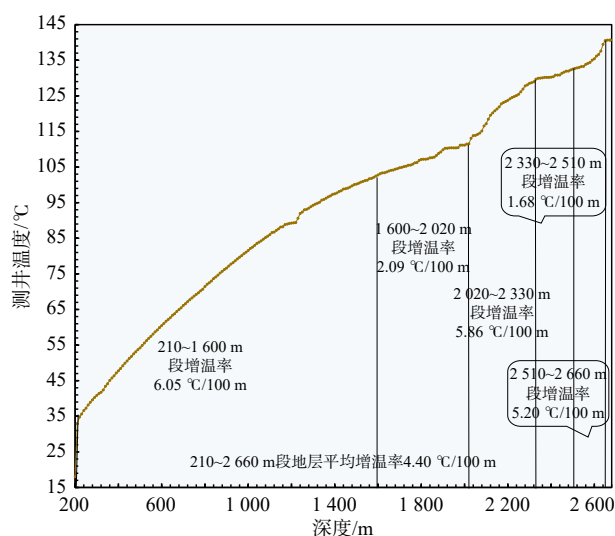


图9 YG-1井静稳态测温曲线图

Fig. 9 Static and steady temperature measurement curve of Well YG-1

验降深 1 210 m, 稳定抽水 25 h 后测得出水温度 101 °C, 单位涌水量为 0.003 7 L/(s·m)。3 次抽水试验测得单位涌水量逐渐减小, 且实测抽水后水位恢复时间变长, 推测 YG-1 井深部承压水以静储量为主, 补给来源有限, 主要靠地下水渗流补给, 补给速度较慢。

4 地热系统分析

4.1 热源机制及热传递方式

研究表明地热资源主要分布在高放射性产热区、沉积盆地和近代火山带以及强烈的构造活动带^[30-31]。大同盆地沉积了巨厚的新生代沉积物, 此类沉积物的低导热率有效防止了深部热源热量的损失。从大同

盆地的形成与演化过程可以得知, 盆地的形成可能是印度—欧亚板块和太平洋—欧亚板块碰撞共同作用的结果^[9, 32], 这导致了华北克拉通中西部弱构造带的部分转换、岩石圈变薄及软流圈上涌^[18, 33]。岩石圈的蚀变和变薄主要表现为深部的岩浆活动, 以及浅部的伸展运动^[34], 大同盆地新生代以来持续的伸展沉陷, 地壳减薄, 地幔隆起, 自下而上发生热侵蚀。上地幔部分熔融形成的岩浆将热量传递到地壳, 持续受热致使构造应力场达到地壳破裂强度, 并发生横向延伸^[35]。地幔物质沿断裂或构造薄弱带喷出地表形成大同火山群, 部分未喷发的岩浆则形成了岩浆囊, 且沿 NE 方向迁移。与此同时大同盆地频繁的地震运动与地热资源的形成也密切相关, 地震运动活化断层裂隙, 深层热源物质更容易向上流动到浅层并形成地热异常。

研究区距大同火山群 30 km, 紧邻北部云门山山前大断裂, 新生代火山活动强烈。基于阳高地区二维地震反演成果(图 10), 研究区的上地壳(埋深 8~12 km)存在低阻层与低阻体, 可能为熔融或半熔融状态的岩浆囊, 该岩浆囊范围较大, 与大同火山群岩浆具有同源性, 且至今未冷却^[6]。研究区地质调查、二维地震、CSAMT 反演及测井资料表明, 云门山山前断裂带由一系列切割深度较大的高角度正断层阶梯状排列构成, 在倾向 NEE 的孤山村正断层叠加作用下, 热量沿断裂带或经热导率高的变质岩地层传递到浅地表形成地热异常, 从而为研究区地热资源的形成提供稳定的热源。

4.2 热储与盖层

据 YG-1 井综合地质成果, 研究区高温地热储层

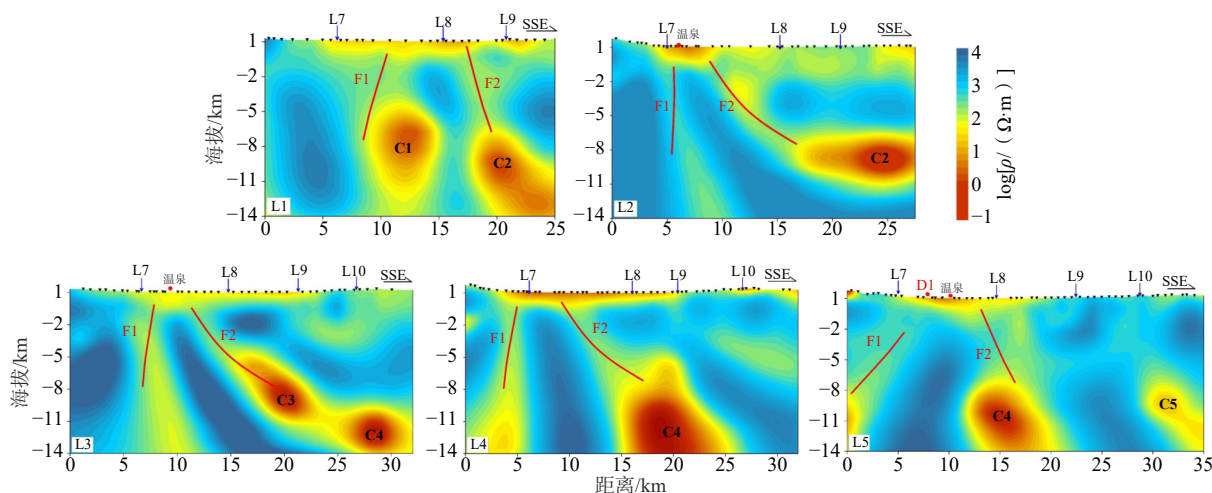


图10 阳高地区二维地震反演成果(据文献[6]修改)

Fig. 10 MT inversion results in the Yanggao area (modified after Ref. [6])

注: 图中 C1、C2、C3、C4、C5 低阻体为未冷却的岩浆囊。

主要为云门山山前深大断裂及其衍生断裂的深部含水岩组及深部太古界变质岩,埋深大于 1 500 m。盖层为上第四系、新近系、古近系砂砾石层、黏土层及热蚀变层。

4.3 地热系统模型

基于大同盆地东部地热区二维地震、AMT 数据反演,认为阳高一天镇地区电性结构模型可以分为对流型地热系统地电模型和传导型地热系统地电模型,靠近云门山大断裂的北部地区,具有明显的对流型高温地热系统的电性结构特征,靠近盆地的南部地区,

具有典型的传导型地热系统电性结构特征^[6]。

北部云门山山区的大气降水及地表水向下运移过程中被热储加热,循环至 1 600 m 甚至更深的位置后,沿着云门山断裂带、孤山村断层交汇处及其附近等高渗透通道上涌,与浅部冷水混合,沿第四系储层横向运移^[36],形成一系列温泉井。图 2 显示的温泉地热井基本沿 NEE 向云门山隐伏断层和 NNW 向孤山村正断层呈线性排布,且温度最高的百度温泉(J-46)和 J-58 分布在 2 条断层交叉位置处,而远离交叉位置处的温泉则温度有明显降低趋势,见表 1。

表 1 研究区地热井统计表

Table 1 Statistics of geothermal wells in the study area

地热井编号	J-1	J-2	J-3	J-8	J-4	J-46	J-58	J-45	J-18	J-19
用途	九龙温泉洗浴	云门山温泉洗浴	吉祥温泉洗浴	阳光 99 温泉洗浴	封存	封存	封存	农田灌溉	农田灌溉	农田灌溉
孔深/m	174	195	>150	>150	154	178	>150	96	120	<100
孔口温度/℃	42	45	45	45	62	104	90	35	28	33
单位流量/(m ³ ·h ⁻¹)	30	50	40	40	45	50		40	40	
地层时代	第四系	第四系	第四系	第四系	第四系	新太古界	第四系	第四系	第四系	第四系
井口标高/m	1 055	1 064	—	—	1 116	1 112	—	1 095	1 113	—
建井时间	2 003	2 003	—	—	2 006	2 009	—	2 000	2 002	—
水位埋深/m	98.6	106.8	—	—	105.4	113.5	—	90.3	113.4	—
年实际开采量/m ³	36 000	28 800	28 800	28 800	0	0	0	19 200	19 200	—

注:表中“—”表示数据无法获取。

研究区 CSAMT 成果 L2 线剖面 S1、S2、S3 区的中低电阻特征推测为低温流体影响所致, YG-1 井的物理测井及静稳态测温资料亦表明该地区高温地热流体存在低温水对流,这为研究区对流型地热系统的存在提供了很好的证据。

另外,研究区 CSAMT 成果 L3 剖面显示明显的 3 个电性层,新生界覆盖层下部为热导率值高的太古界基底地层,结合阳高一天镇地区地震及二维地震成果^[6, 16-17, 19-20]可知,中上地壳未冷却的岩浆囊及更深处地幔岩浆房所释放的热量,沿云门山断裂带或沿热导率高的变质岩基底地层传导至浅层地热储层,第四系盖层中的黏土层有效阻挡了热量的散失, YG-1 井测温资料所反映的变质岩地层高增温率为传导型地热系统提供了证据。综上所述,研究区高温地热系统为对流、传导型地热系统(图 11)。

5 讨论

5.1 干热岩型地热资源的可能性

干热岩地热资源主要有高放射性产热型、沉积盆地型、近代火山型以及强烈构造活动带型等 4 种成因

类型^[37]。研究区位于阳高一天镇盆地,热导率值高的太古界变质岩基底之上覆盖着第四系、新近系、古近系盖层,盆地新生代火山活动、地震活动频繁,这些为干热岩资源提供了良好的成矿条件。从现有天镇 DR1 井和阳高 YG-1 井的勘探成果看,阳高一天镇地热田

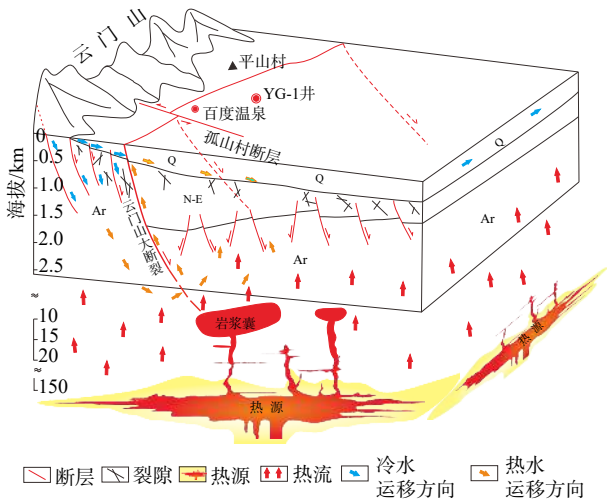


图 11 研究区三维地热系统模型

Fig. 11 3D geothermal system model of the study area

地温梯度值高,只要钻孔深度足够,完全有希望探获干热岩型地热资源。而且通常情况下干热型地热资源与水热型地热资源具有同源共生的特征^[38],阳高—天镇地区现已探获高温水热型地热资源,因此,不难推断该地区同样存在干热岩型地热资源,有待进一步勘探证实。

5.2 地热资源开发利用前景

我国的地热资源分为水热型地热资源、干热型地热资源以及浅层地热资源 3 大类^[38]。阳高—天镇地区已探获高温水热型地热资源,并在天镇建成了我国中东部地区首座高温地热发电站,从资源品位看,该地区水热型地热资源可用于发电、供暖、康养旅游、绿色农业等梯级循环利用。但从资源量考虑,为了保护地下水资源,在变质岩裂隙型热储回灌技术还不成熟的条件下,应限制水热型地热资源的直接开采。当前针对中深层地热资源无扰供热而开发的单井 U 型管、单井同轴套管和重力热管技术,适用于水热型甚至干热岩型地热资源利用,对地下水无干扰,实现了“取热不取水”,但在换热效率方面还有待更深入的研究^[39]。

研究结果表明,阳高—天镇地区浅层地热资源丰富,200 m 以浅的地热资源温度高,深部热源持续补给,地温恢复快,采用埋管+热泵技术可用于建筑物供暖制冷,效益显著。与此同时,该地区干热岩型地热资源也具备很好的成矿背景,干热岩地热资源具有能量大、可再生、利用率极高、安全性好、无污染等优点,若能成功开发利用,将对推进晋北地区地热能开发利用具有重要意义。

6 结论及建议

(1)研究区地层从上至下可划分为 3 段:第一段为以第四系堆积物为主的热储盖层,第二段为以新近系、古近系砂砾石为主的热蚀变层,第三段为太古界变质岩热储。

(2)云门山山前断裂带及孤山村正断层为主要的控热构造,直接热源可能为中上地壳未冷却的岩浆囊,伸展构造应力作用下,上地幔部分熔融体沿深大断裂或构造薄弱带上涌形成岩浆囊,热量沿断裂破碎带或经热导率高的变质岩地层传递到浅地表形成地热异常。

(3)阳高—天镇地区高温地热系统为对流、传导型,大气降水和地表低温水下渗过程中经热储加热,高温水沿断裂带上涌至第四系盖层下扩散运移,形成水循环系统。

(4)基于研究区地质调查、物探、钻探、测井测温等资料,推断阳高—天镇地区具备良好的干热岩找矿

远景区,需进一步勘探验证。

(5)阳高—天镇地区地热资源开发利用可尝试采用中深层地热资源无扰开发技术,避免对地下水资源的破坏。

参考文献 (References) :

- [1] 连碧鹏. 山西省地热能分级分类利用指南(试行)[Z]. 太原: 山西省自然资源厅, 2022. [LIAN Bipeng. Guidelines for classification and utilization of geothermal energy in Shanxi Province (Trial)[Z]. Taiyuan: Department of Natural Resources of Shanxi Province, 2022. (in Chinese)]
- [2] 张薇, 王贵玲, 刘峰, 等. 中国沉积盆地型地热资源特征[J]. 中国地质, 2019, 46(2): 255 - 268. [ZHANG Wei, WANG Guiling, LIU Feng, et al. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins[J]. Geology in China, 2019, 46(2): 255 - 268. (in Chinese with English abstract)]
- [3] 任高京, 韦梅华, 王斌, 等. 山西省阳高县—天镇县一带干热岩地热资源预可行性勘查报告[R]. 太原: 山西第一水文地质工程地质队, 2020. [REN Gaojing, WEI Meihua, WANG Bin, et al. Prefeasibility exploration report of dry-hot rock geothermal resources in Yanggao-Tianzhen County, Shanxi Province [R]. Taiyuan: Shanxi First Hydrogeological Engineering Geological Team, 2020. (in Chinese)]
- [4] 潘良云, 孟令箭, 孙福利, 等. 山西大同盆地北部地热地质特征及资源潜力[J/OL]. 中国地质, (2022-06-08) [2023-04-26]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=3uoqIhG8C45S0n9fL2suRadTyEV12pW9UrTDCdPD67egNjml5Wv0pAPsqxNSG7KBqpM_QmU8RZ2Wo a8KDglra6b-xurltdC&uniplatform=NZKPT&src=copy. [PAN Liangyun, MENG Lingjian, SUN Fuli, et al. Geothermal geological characteristics and resource potential in the north of Datong Basin, Shanxi Province[J/OL]. Geology in China, (2022-06-08) [2023-04-26]. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 王平, 师鹏峰. 大同地区干热岩勘查高温高压自喷井综合治理工艺[C]//中国地质学会探矿工程专业委员会. 第二十一届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集. 北京: 地质出版社, 2021: 258 - 263. [WANG Ping, SHI Pengfeng. Comprehensive treatment technology for high temperature and high pressure bellowing wells in hot dry rock exploration in Datong [C]//Professional Committee of Prospecting Engineering, Chinese Geological Society. Proceedings of the 21st Annual Academic Exchange Conference of National Prospecting Engineering (Geotechnical Drilling Engineering). Beijing: Geological Publishing House,

- 2021; 258 – 263. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 周文龙. 大同盆地东北部地热区电性结构探测研究 [D]. 武汉: 中国地质大学(武汉), 2021. [ZHOU Wenlong. Electrical structure of geothermal area in northeast of Datong Basin[D]. Wuhan: China University of Geosciences(Wuhan), 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 杨建中. 阳高县平山村P1地热井地热资源评价[J]. [山西建筑](#), 2014, 40(20): 238 – 240. [YANG Jianzhong. On geothermal resources evaluation of P1 geothermal wells at Pingshan Village of Yanggao County[J]. [Shanxi Architecture](#), 2014, 40(20): 238 – 240. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 罗全星, 李传友, 任光雪, 等. 阳高—天镇断裂晚第四纪活动特征及滑动速率[J]. [地震地质](#), 2020, 42(2): 399 – 413. [LUO Quanxing, LI Chuanyou, REN Guangxue, et al. The late quaternary activity features and slip rate of the Yanggao-Tianzhen fault[J]. [Seismology and Geology](#), 2020, 42(2): 399 – 413. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 岑敏, 董树文, 施伟, 等. 大同盆地形成机制的构造研究[J]. [地质论评](#), 2015, 61(6): 1235 – 1247. [CEN Min, DONG Shuwen, SHI Wei, et al. Structural analysis on the formation mechanism of Datong Basin[J]. [Geological Review](#), 2015, 61(6): 1235 – 1247. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J]. [中国科学\(D辑: 地球科学\)](#), 2011, 41(5): 583 – 592. [ZHU Rixiang, CHEN Ling, WU Fuyuan, et al. Time, scope and mechanism of North China Craton destruction[J]. [Scientia Sinica \(Terrae\)](#), 2011, 41(5): 583 – 592. (in Chinese)]
- [11] SHI Wei, CEN Min, CHEN Long, et al. Evolution of the late Cenozoic tectonic stress regime in the Shanxi Rift, central North China Plate inferred from new fault kinematic analysis[J]. [Journal of Asian Earth Sciences](#), 2015, 114: 54 – 72.
- [12] 刘爱荣, 徐永婧, 刘成林, 等. 大同盆地地质特征及构造演化研究[J]. [现代地质](#), 2021, 35(5): 1296 – 1310. [LIU Airong, XU Yongjing, LIU Chenglin, et al. Geological characteristics and tectonic evolution of Datong Basin[J]. [Geoscience](#), 2021, 35(5): 1296 – 1310. (in Chinese with English abstract)]
- [13] HE Lipeng, GUO Zhen, CHEN Yongshun John, et al. Seismic imaging of a magma chamber and melt recharge of the dormant Datong volcanoes[J]. [Earth and Space Science](#), 2021, 8: e2021EA00193.
- [14] LI Shilin, GUO Zhen, CHEN Yongshun John, et al. Lithospheric structure of the Northern Ordos from ambient noise and teleseismic surface wave tomography[J]. [Journal of Geophysical Research: Solid Earth](#), 2018, 123(8): 6940 – 6957.
- [15] LEI Jianshe. Upper-mantle tomography and dynamics beneath the North China Craton[J]. [Journal of Geophysical Research: Solid Earth](#), 2012, 117(B6): B06313.
- [16] XU Hongrui, LUO Yinhe, YANG Yingjie, et al. Three-dimensional crustal structures of the Shanxi rift constructed by Rayleigh wave dispersion curves and ellipticity: Implication for sedimentation, intraplate volcanism, and seismicity[J]. [Journal of Geophysical Research: Solid Earth](#), 2020, 125(11): e2020JB020146.
- [17] ZHANG Huiqian, HUANG Qinghua, ZHAO Guoze, et al. Three-dimensional conductivity model of crust and uppermost mantle at the northern Trans North China Orogen: Evidence for a mantle source of Datong volcanoes[J]. [Earth and Planetary Science Letters](#), 2016, 453: 182 – 192.
- [18] XU Xiaobing, ZHAO Liang, WANG Kun, et al. Indication from finite-frequency tomography beneath the North China Craton: The heterogeneity of craton destruction[J]. [Science China Earth Sciences](#), 2018, 61(9): 1238 – 1260.
- [19] ZHOU Wenlong, HU Xiangyun, GUO Hongdang, et al. Three-dimensional magnetotelluric inversion reveals the typical geothermal structure of Yanggao geothermal field in Datong Basin, Northern China[J]. [Geothermics](#), 2022, 105: 102505.
- [20] ZHOU Wenlong, HU Xiangyun, YAN Shilong, et al. Genetic analysis of geothermal resources and geothermal geological characteristics in Datong Basin, Northern China[J]. [Energies](#), 2020, 13(7): 1792.
- [21] 窦素芹, 张世民. 大同盆地第四纪火山与盆地内地震活动的关系[J]. [地壳构造与地壳应力文集](#), 1996(1): 52 – 58. [DOU Suqin, ZHANG Shimin. The relation between Quaternary volcano and earthquake activity in the Datong Basin[J]. [Bulletin of the Institute of Crustal Dynamics](#), 1996(1): 52 – 58. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 宋美琴, 郑勇, 葛繁, 等. 山西地震带中小震精确位置及其显示的山西地震构造特征[J]. [地球物理学报](#), 2012, 55(2): 513 – 525. [SONG Meiqin, ZHENG Yong, GE Can, et al. Relocation of small to moderate earthquakes in Shanxi Province and its relation to the seismogenic structures[J]. [Chinese Journal of Geophysics](#), 2012, 55(2): 513 – 525. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 李德威. 地震与地热的关联性: 从预测减灾到取能减灾[J]. [地球科学与环境学报](#), 2017, 39(4): 563 – 574. [LI Dewei. Relevance of seismicity and geothermics: A

- new thought to alleviate disasters from earthquake prediction to taking energy[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2017, 39(4): 563 – 574. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 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)]
- [25] 刘峰, 王贵玲, 张薇, 等. 江西宁都县北部大地热流特征及地热资源成因机制[J]. *地质通报*, 2020, 39(12): 1883 – 1890. [LIU Feng, WANG Guiling, ZHANG Wei, et al. Terrestrial heat flow and geothermal genesis mechanism of geothermal resources in northern Ningdu County, Jiangxi Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(12): 1883 – 1890. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 谢富仁, 崔效锋, 赵建涛, 等. 中国大陆及邻区现代构造应力场分区[J]. *地球物理学报*, 2004, 47(4): 654 – 662. [XIE Furen, CUI Xiaofeng, ZHAO Jiantao, et al. Regional division of the recent tectonic stress field in China and adjacent areas[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, 47(4): 654 – 662. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 李瑞莎, 崔效锋, 刁桂苓, 等. 华北北部地区现今应力场时空变化特征研究[J]. *地震学报*, 2008, 30(6): 570 – 580. [LI Ruisha, CUI Xiaofeng, DIAO Guiling, et al. Temporal and spatial variation of the present crustal stress in northern part of North China[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2008, 30(6): 570 – 580. (in Chinese with English abstract)]
- [28] SASS J H, LACHENBRUCH A H, MOSES T H JR, et al. Heat flow from a scientific research well at Cajon Pass, California[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(B4): 5017 – 5030.
- [29] 邱楠生, 胡圣标, 何丽娟, 等. 沉积盆地热体制研究的理论与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 10 – 18. [QIU Nansheng, HU Shengbiao, HE Lijuan, et al. Theory and application of thermal system research in sedimentary basins[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 10 – 18. (in Chinese)]
- [30] 甘浩男, 王贵玲, 蔺文静, 等. 中国干热岩资源主要赋存类型与成因模式[J]. *科技导报*, 2015, 33(19): 22 – 27. [GAN Haonan, WANG Guiling, LIN Wenjing, et al. Research on the occurrence types and genetic models of hot dry rock resources in China[J]. *Science & Technology Review*, 2015, 33(19): 22 – 27. (in Chinese with English abstract)]
- [31] LU Chuan, LIN Wenjing, GAN Haonan, et al. Occurrence types and genesis models of hot dry rock resources in China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(19): 646.
- [32] LI Sanzhong, ZHAO Guochun, DAI Liming, et al. Cenozoic faulting of the Bohai Bay Basin and its bearing on the destruction of the Eastern North China Craton[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 47: 80 – 93.
- [33] ZHAI Mingguo. Cratonization and the Ancient North China Continent: A summary and review[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 54(8): 1110 – 1120.
- [34] ZHU Rixiang, XU Yigang, ZHU Guang, et al. Destruction of the North China craton[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(10): 1565 – 1587.
- [35] 杨文采. 从地壳上地幔构造看大陆岩石圈伸展与裂解[J]. *地质论评*, 2014, 60(5): 945 – 961. [YANG Wencai. Continental extension and rifting revealed by worldwide comparison of crust and upper mantle structures[J]. *Geological Review*, 2014, 60(5): 945 – 961. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 郑秀清, 李义明, 陈忠, 等. 阳高—天镇盆地马圈崖地下热水系统[J]. *太原理工大学学报*, 2000, 31(1): 68 – 71. [ZHENG Xiuqing, LI Yiming, CHEN Zhong, et al. Majuanxiang underground thermal water system in Yanggao-Tianzhen Basin[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2000, 31(1): 68 – 71. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 蔺文静, 王贵玲, 邵景力, 等. 我国干热岩资源分布及勘探: 进展与启示[J]. *地质学报*, 2021, 95(5): 1366 – 1381. [LIN Wenjing, WANG Guiling, SHAO Jingli, et al. Distribution and exploration of hot dry rock resources in China: Progress and inspiration[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(5): 1366 – 1381. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 王贵玲, 蔺文静. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式[J]. *地质学报*, 2020, 94(7): 1923 – 1937. [WANG Guiling, LIN Wenjing. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(7): 1923 – 1937. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 王贵玲, 陆川. 碳中和目标驱动下地热资源开采利用技术进展[J]. *地质与资源*, 2022, 31(3): 412 – 425. [WANG Guiling, LU Chuan. Progress of geothermal resources exploitation and utilization technology driven by carbon neutralization target[J]. *Geology and Resources*, 2022, 31(3): 412 – 425. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 汪美华
刘真真