

西藏羊八井地热田三维电性结构模型 ——来自大地电磁的证据

薛国强^{1,2} 陈卫营^{1,2} 赵平^{2,3} 任旺奇⁴ 何一鸣^{1,2} 吕鹏飞^{1,2} 雷康信^{1,2} 赵炀^{1,2}

1 中国科学院地质与地球物理研究所

2 中国科学院青藏研究所

摘要:西藏羊八井地热田位于亚东-古露裂谷中部的断陷盆地,延展形态受西北、东南两侧的山前断裂带控制,地热发电已超过四十年。囿于三维地球物理探测资料,地热田局部熔融体的位置、埋藏深度和几何形态,以及地热流体的升流通道等关键地质问题长期存有争议。本文利用47个测点的实测大地电磁全阻抗张量数据进行三维反演,给出了羊八井地热田三维电性结构模型在不同深度的水平切片和在不同测线的剖面图,取得了以下认识:(1)局部熔融体是羊八井地热田的深部热源,位于中尼公路下方,沿北东方向伸展,埋藏深度6.2~14km;(2)地热流体升流通道位于北区硫磺沟一带,呈开口朝上的喇叭形状,北区2km深度以下的岩石裂隙不够发育、渗透性较差,尚未发现富水性较好的层状热储;(3)南区不存在深层高温热储,在北区应用增强型地热系统(EGS)技术将是羊八井地热田提高发电能力的重要途径。

关键词:羊八井地热田 大地电磁 局部熔融体 三维电性结构 地质成因模型

1 引言

地热能是一种可再生的绿色能源,开发利用地热能对于减少CO₂排放、减缓气候变化具有十分重要的意义(Schumacher 和 Moeck, 2020; Agemar, 2022)。羊八井地热田第一台300kW的发电机组于1977年投入运行;同年,1MW的1号发电机组投入运行;1981~1985年期间,又先后安装了3台3MW的发电机组,正式组建了地热电厂。如今,羊八井地热电厂的总装机容量为25.18MW。截至2019年12月底累计发电34.1亿千瓦时,减少CO₂排放约275万吨,为西藏社会经济发展和节能减排做出了重要贡献。近年来,地热井的压力和流量呈现衰减趋势,浅层地热流体已不能维持有机组长时间、满负荷地发电,开发利用深部高温地热资源势在必行。1983~1984年,意大利AQUATER和ENEL公司借助重力、磁场和直流电测深资料,圈定了地热田的浅部异常。重力测量表明,羊八井地热田在区域重力场中显示为负异常,等值线大体沿北东方向伸展,而且西北处的重力异常线起伏比较大,菱块状断裂较为发育。地热田磁场也处于负异常,深部花岗岩体表现为弱磁性,随着蚀变程度的增加,磁性逐渐减弱,断裂带附近表现为局部的线状磁性负

异常,而且弱磁性异常与重力负异常的位置基本吻合。20世纪70~90年代开展的直流电测深结果表明:地热流体电阻率是2.2~3Ωm,含热水砂砾岩或蚀变花岗岩是11~15Ωm,泉华是65Ωm,地表冷水接近100Ωm,未蚀变花岗岩则高达300~1500Ωm(靳宝福和程力军,1993)。应用地热流体与地表冷水、岩石之间的电性差异,可以比较准确地圈定出地热流体的赋存位置和空间形态,推测基岩埋深和热储厚度等。在羊八井地热田,视电阻率极小值30Ωm圈定出来的范围与地下5m等温线所圈定的范围基本吻合(施国良,1983)。1980~1982年,中法青藏高原地球科学联合考察队在羊八井地热田开展了大地电磁法测量(Magnetotelluric, MT),在10~20km深部发现一个低阻层,推测是地壳内部的局部熔融区,而两组断裂交汇处所形成的基岩“破碎柱”则是地热流体上升通道(吴钦等,1990)。康文华等(1983)根据二维大地电磁测深结果,推断羊八井地热田15km深处存在着一个岩浆房,是地热田的深部热源。1993~1994年,日本九州大学和中国长春地质学院联合考察队在羊八井地热田布设了9个MT测点,根据探测结果提出在12km之下存在着局部熔融体。1994年,意大利 Geotermica

Italiana 公司的专家根据 15 个 MT 测点的二维反演结果,推测地热田北区 5km 深处可能出现岩浆囊(廖志杰和赵平,1999)。青藏高原与喜马拉雅深部剖面探测国际合作项目(INDEPTH)在念青唐古拉山东侧的安岗、羊八井、念青和当雄等地发现了 4 个地震深反射亮点,用多种不同方法证实其为壳内低速体,解释为含水的局部熔融体或花岗质岩浆层,埋藏深度为 15~20km,这些亮点与地面出露的热泉相对应(Brown 等,1996;赵平等,2001)。四十多年以来,经过大量的构造地质、岩石矿物、流体地球化学、地球物理探测、钻孔测井等基础性研究,大家普遍认同羊八井地热田是一个具有岩浆热源的、对流型高温地热系统。前人在羊八井地热田开展的地球物理勘探大多是二维数据反演,难以反映地下深部的真实形态和电性特征(Newman 和 Alumbaugh, 2000; Siripunvaraporn 等, 2005)。近年来快速发展的三维数据反演技术能够较好地克服这些缺点。大地电磁法(MT)能够识别出含水层、低于 150℃ 的蚀变岩层和局部熔融所引起的低阻异常(Cumming 和 Mackie, 2010; Lee 等, 2020),具有超过 10km 深度的探测能力(唐裕等, 2021; 薛帅等, 2022; 余年等, 2022)。2021 年,本文研究团队利用地热电厂停产维修的空期,在地热田布置 54 个测点采集大地电磁全阻抗张量数据,其中 47 个测点数据经反演处理后获得了地热田的三维电性结构,揭示了局部熔融体的位置、埋藏深度和几何形态,确定了高温地热流体的升流通道及其形状。这些成果将为羊八井地热电厂改造工程提供科学依据。

2 地质概况

印度板块与欧亚板块汇聚碰撞后持续向北俯冲,形成了地球上海拔最高、最年轻的高原——青藏高原(许志琴等, 2006)。青藏高原是全球构造活动最剧烈的地区,西藏境内的活动构造带主要有 NE、NW 和 SN 向三个构造成分组成(图 1a),其中构造活动最强烈、表现最突出的是一系列近 SN 向延展的活动构造带,它们是控制西藏发生地震和地热活动最重要的构造(韩同林, 1984)。在 SN 向裂谷/地堑中,亚东-古露裂谷的规模最大,延伸最长,蕴藏着丰富的高温地热资源,已建有羊八井和羊易两座地热电厂。羊八井地热田位于西藏自治区拉萨市西北约 90km 处的当雄县羊八井镇,处于雅鲁藏布江缝合带和青藏高原地幔缝合带北侧(Klemperer 等, 2022)、亚东-古露裂谷中部的断陷盆地,其西北方向是念青唐古拉山脉,东南方向是唐山山脉。地热田内水热活动发育,显示类型包括温泉、热泉、沸泉、热水湖、水热爆炸、喷气孔、冒汽地面、硅华、钙华、盐华和水热蚀变等。随着地热资源开采量的不断增加,绝大多数温泉现已消失,热水湖也接近干涸。羊八井地热田发育着 NE、NW 和近 SN 向三组断裂,中尼公路将其分成南、北两区。北区主要由古生代变质岩、喜山期花岗岩和始-渐新世火山岩组成,浅层热储从蚀变花岗岩沿东南方向逐步过渡到第四系砂砾岩,热储温度为 150~175℃;深层热储是温度超过 250℃ 的蚀变花岗岩。南区浅层热储由第四系砂砾岩组成,硅质/钙质胶结物形成自封闭的热储盖层,其温度大多不超过 150℃(图 1b)(廖志杰和赵平, 1999)。

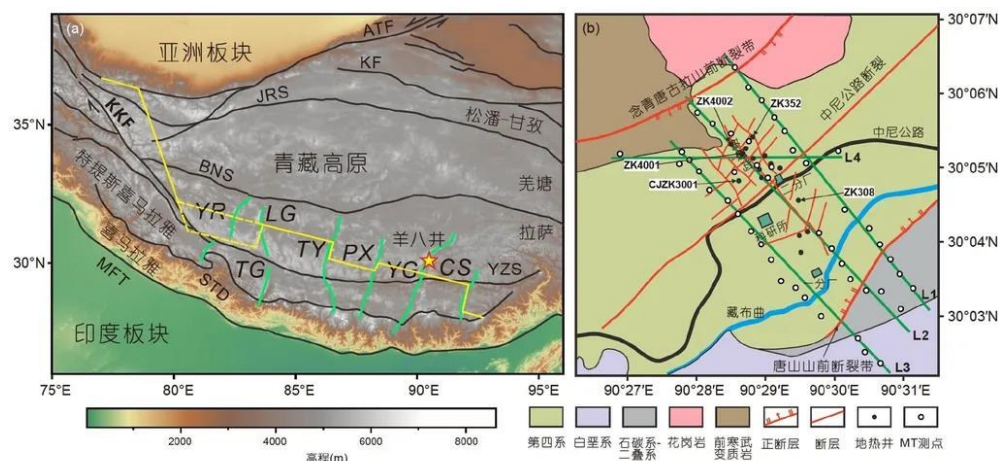


图1 羊八井地热田构造位置及大地电磁测点分布

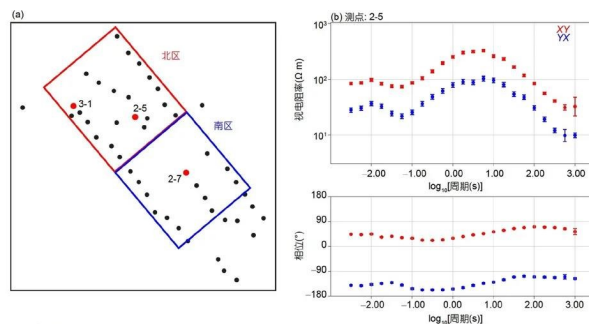
(a)青藏高原大地构造简图(修改自 Klemperer 等, 2022)。从南向北的缝合带/主要断层(黑色细线): MFT, 主喜马拉雅逆冲断裂; STD, 藏南拆离系; YZS, 雅鲁藏布江缝合带; BNS, 班公湖-怒江缝合带; JRS, 金沙江缝合带; ATF, 阿尔金走滑断裂; KF, 昆仑走滑断裂; KKF, 喀喇昆仑走滑断裂。近南北向裂谷/地堑(绿色粗线): YR, 亚热裂谷; TG, 塔科拉地堑; LG, 隆格尔地堑; TY, 当惹雍措裂谷; PX, 朋曲-申扎裂谷; YG, 亚东-古露裂谷; CS, 错那-桑日裂谷。黄线是地幔缝合带; 黄色五角星对应(b)的研究区域。(b)羊八井地热田大地电磁测点分布图(修改自 Wang 等, 2022)

为了探寻深层高温地热资源, 羊八井地热田先后打过 5 口深度超过千米的勘探井。地热田南区 ZK308 井深 1726m, 井温在 150m 深处达到 144.4℃, 200m 处温度出现倒转, 800m 深处温度恢复上升。北区 ZK352 井深 1003m, 986m 深处测得 202℃ 的温度, 井筒下部的花岗岩裂隙不发育; ZK4002 井深 2006.8m, 1850m 深处测得 329.8℃ 的最高井温, 间歇性喷发, 未获得可开发利用的流量; ZK4001 井深 1459m, 最高井温是 255℃, 放喷试验的井口温度是 200℃, 流量为 300t/h; CJZK3001 井深 2254.5m, 1200m 以下检测到 270℃ 的温度, 深部岩石的渗透性较差, 裂隙不够发育(赵平和多吉, 2021)。羊八井地热田的水热蚀变矿物比较丰富, 前人在地表和岩芯样品中观察到的蚀变矿物主要有蛋白石、玉髓、明矾石、高岭石、蒙脱石、伊利石、绿泥石、伊利石-蒙脱石混层矿物(I-M)和绿泥石-蒙脱石混层矿物(C-M)、绿帘石等。蛋白石、玉髓、明矾石和高岭石出露在北区的酸性蚀变带, 是地热蒸气冷凝后与围岩发生化学反应的产物。蒙脱石、伊利石、伊利石-蒙脱石混层矿物等是在近中性环境普遍出现的蚀变矿物。当温度升高时, 绿泥石-蒙脱石混层矿物将逐渐替代伊利石-蒙脱石混层矿物(朱梅湘和徐勇, 1989)。绿帘石被认为是 240℃ 以上高温地热流体的指示矿物(Browne, 1978), 可见于羊八井地热田勘查深层热储的钻孔岩芯, 如 ZK4001 井等。

3 数据的采集和处理分析

2021 年, 本研究在羊八井地热田布置了 4 条

MT 测线(L1、L2、L3 和 L4), 测线间距大约为 1km, 测点间距约 500m(图 1b), 共采集了 54 个测点的大地电磁全阻抗张量数据。野外数据采集设备采用中国科学院研制的新型 SEP 地面电磁探测系统(底青云等, 2021)。在每个 MT 测点, 采用不极化电极测量电场的两个水平分量 E_x (南北向)和 E_y (东西向), 采用磁传感器测量磁场的三个分量 H_x (南北向)、 H_y (东西向)和 H_z 。每个测点的观测时间超过 10h, 有效频率范围是 320 ~ 0.001Hz。应用 Robust 阻抗估计方法(Egbert, 1997)和远程参考技术(Gamble 等, 1979)压制实测数据噪声干扰。野外工作远程参考点布设在羊八井东南方向约 100km 的拉萨市达孜区。剔除羊八井地热电厂二分厂附近具有明显的“飞点”或受干扰严重的测点, 最终获得 47 个测点的全阻抗张量数据(Z_{xx} 、 Z_{xy} 、 Z_{yx} 、 Z_{yy})。图 2 是地热田典型测点的 MT 视电阻率和相位曲线, 各测点曲线光滑, 数据质量良好, 不同位置的视电阻率有明显的变化, 表明地下电性结构存在着显著的差异。2-5 和 3-1 测点位于北区(图 2b、2c), 短周期(0.003 ~ 0.1s)视电阻率随周期增大而减小, 表明地表比较干燥、地下浅层存在着低阻层, 对应着北区浅层花岗岩裂隙型热储, 长周期(0.1 ~ 1000s)可观察到视电阻率先增加后减小的现象, 表明浅部低阻体之下有高阻体, 深部存在低阻体, 对应着深层热储; 2-7 测点位于南区(图 2d), 短周期(0.003 ~ 0.1s)的视电阻率较低, 表明从地表到深部, 浅层存在着连续的低阻体, 对应着南区浅层孔隙型热储, 但长周期(0.1 ~ 1000s)视电阻率的变化规律与 2-5 和 3-1 测点相同, 表明测点深部也存在着低阻体。上述所有测点都在低频段表现为较低的视电阻率, 指示地热田深部存在着明显的低阻异常。



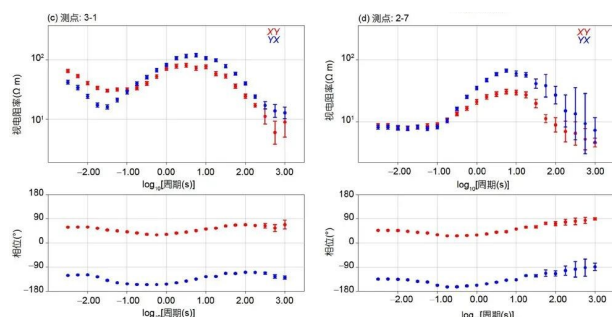


图2 羊八井地热田MT测点分布图和不同测点处视电阻率(上)和相位(下)曲线

(a) MT测点分布图;(b) 2-5测点;(c) 3-1测点;(d) 2-7测点

为了评价地热田电性结构的维度特征,对所有测点的相位张量椭圆进行了维度分析(Caldwell等,2004)。相位张量可以采用椭圆表示,椭圆偏离度(skew)反映维度结构,椭圆越接近正圆,地下结构越接近一维。当偏离度 $\leq 5^\circ$ 时,近似为二维结构;当偏离度 $> 5^\circ$ 时,可视为三维结构(Booker, 2014)。在地表最浅层($T=0.01s$),地热田相位张量椭圆接近正圆,反映地热田浅层为近一维电阻率结构的第四纪沉积物;在地下中浅部($T=1s$),相位张量偏离度较小,可视为二维结构,椭圆长轴为北东向,与区域断裂构造的走向一致;在地下深部($T>100s$),大部分测点的偏离度 $> 5^\circ$,说明深部的三维性较强(图3)。因此,开展三维反演研究可以获得更加可靠的深部电性结构。

4 数据三维反演

采用三维非线性共轭梯度(NLCG)算法(Mod EM, Egbert 和 Kelbert, 2012; Kelbert 等, 2014)对MT数据进行三维反演处理。NLCG算法不需要直接计算和存储灵敏度矩阵,计算速度快,内存需求小(Rodi 和 Mackie, 2001),是MT数据二维和三维反演最常用的算法。反演的数据类型为全阻抗张量(Z_{xx} 、 Z_{xy} 、 Z_{yx} 、 Z_{yy})。在320~0.001Hz频率范围内,23个频点等对数间隔分布,阻抗分量误差限设置为 $5\% \times |Z_{xy}|/2$ 。由于倾子数据质量较差,未加入反演处理。将阻抗张量数据逆时针旋转 50° ,使xy分量与测线平行,可以减少模型网格,减少计算量。

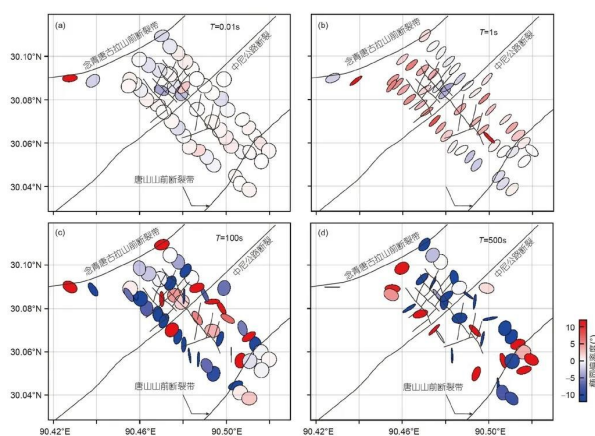


图3 不同测点不同周期的相位张量椭圆

黑色线条表示深大断裂

反演初始模型垂直方向第一层为10m,每层厚度随着深度增加而逐渐加大,递增系数为1.2.水平方向中心区的网格尺寸为 $300m \times 300m$,每个网格上最多只有一个测点,中心区以外水平方向各填充14个单元格,每格边长的递增系数为1.3.模型边界远离测点覆盖区域,避免边界对反演结果的影响,网格总数量为 $52 \times 70 \times 60$.对初始模型的电阻率、光滑系数、初始正则化因子采用了不同的设置进行反演测试。不同参数反演结果显示的异常特征基本一致。其中,初始模型为 $100\Omega m$ 的均匀半空间、光滑系数为0.3、初始正则化因子为10时得到的异常最为清晰。因此,基于该参数设置进行反演处理,归一化数据均方根拟合差(RMS)的初始值为8.66,经过97次迭代,RMS最终收敛为1.85。图4给出了反演结束后各测点的RMS分布图。从图4可见,大部分测点RMS值小于2,单点拟合差的水平接近总体拟合差。MT探测的深度受到观测频率和地下电性结构的共同影响。为了解反演结果的可靠性,采用正演测试方法对数据灵敏度进行评估。首先进行深度分辨力测试,如图5所示,将L2剖面反演结果模型在16和18km深度以下的电阻率修改为初始背景电阻率 $100\Omega m$,16km以下修改模型标记为M1,18km以下标记为M2.分别对M1和M2进行正演计算,然后检查数据拟合变化情况,以此判别观测数据对该深度以下电性结构的敏感程度。修改模型正演计算得到的响应与观测数据之间的RMS拟合差值越大,表明观测数据对该深度以下的电性结构越敏感。

反演响应和观测数据的RMS拟合差值为1.85,M1正演响应为3.12,M2正演响应为2.95,M1和M2正演响应拟合差值显著增加,表明观测数据对16km以浅具有较高的灵敏度.大地电磁三维数据反演结果揭示,在地热田中尼公路下方存在一个低阻体,电阻率为 $15 \sim 30 \Omega\text{m}$,推测是局部熔融体,也就是羊八井地热田的深部岩浆热源,埋藏深度是 $6.2 \sim 14 \text{ km}$.为了验证该低阻体的反演可靠性,进行了深部低阻体的灵敏度测试.在地热田南北区下方 $6.2 \sim 14 \text{ km}$ 深度范围内,首先将图6a白框之内的电阻率设定为 $100 \Omega\text{m}$ 建立检验模型,然后再进行三维正演处理.将观测数据反演模型响应曲线和检验模型反演响应曲线进行比较,发现两者之间有一定的偏差(图6b~6d),证明观测数据对地热田深部低阻异常具有较高的。

5 三维电性结构

热储电阻率主要受蚀变矿物和填充孔隙空间的地热流体所控制(Ussher等,2000)。地热流体的电阻率主要取决于盐度,温度影响较小。岩石电阻率除了与造岩矿物的种类、含量和排列方向有关外,还与渗透率、孔隙率、孔隙结构等因素有关。孔隙连通性越好,渗透性越高,电阻率越小。黏土矿物的种类对岩石电阻率也有很大的影响。地热流体在岩石中长时间滞留,可以在小于 100°C 的条件下形成黏土矿物盖层。在 $70 \sim 150^\circ\text{C}$ 区间,黏土矿物主要是蒙脱石。当温度超过 180°C 时,出现伊利石/绿泥石与蒙脱石互层,绿泥石比例随温度升高而增加。当温度超过 220°C 时,绿泥石和绿帘石成为主要黏土矿物。蒙脱石的阳离子在矿物晶格中的结合程度较弱,因而导电能力较强,电阻率低于 $10 \Omega\text{m}$ 。绿泥石和绿帘石则恰恰相反,电阻率超过 $10 \Omega\text{m}$ 。在高温地热系统中,盖层中含有大量的低电阻率黏土矿物,盖层之下电阻率增加反映的则是温度的升高(Muñoz,2014)。

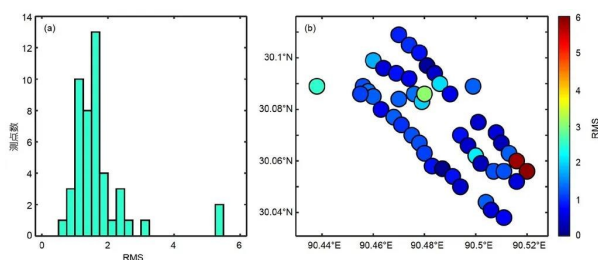


图4 反演结果拟合残差统计与分布

(a)反演模型响应归一化均方根拟合差(RMS)直方图;(b)RMS平面分布图

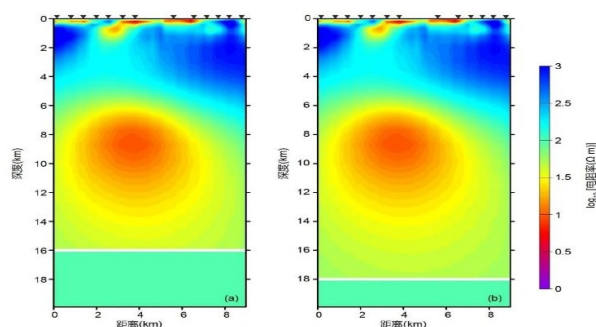


图5 深部灵敏度测试

(a)16km 修改模型 M1 示意图(L2 剖面);(b)18km 修改模型 M2 示意图(L2 剖面)

在岩浆型高温地热系统中,渗透性良好的升流通道经常出现绿泥石,热储电阻率介于 $10 \sim 200 \Omega\text{m}$ 。地热流体在冷热水密度差和地势差的驱动下,沿着裂隙或断裂向上迁移,温度随深度减小而降低。升流通道的顶端是溢流区,在渗透性较低的蒙脱石盖层之下转折为水平流动。溢流区表现为等温线模式,其特点是热储温度在流动方向上变化较小,但会随深度增加而降低(Cumming,2009)。高温热储之下的热源是局部熔融体或岩浆房,岩浆熔体通常具有较低的电阻率。黏土盖层之下的热储温度最高,含有中低电阻率的绿泥石,流体饱和度、孔隙度和渗透率都比较高,是地热开发利用最理想的热储(Muñoz,2014)。图7给出了羊八井地热田三维电性结构模型在不同深度的水平切片。在1km深度切片上(图7a)出现了两个低电阻率区:北区C1是深层热储,南区C2低阻异常随深度增加而逐渐减小,推测是富水性较好的燕山期碎裂花岗岩,汇聚着来自唐山山脉的大气降水,与深部岩石的连通性较差。高电阻率R将C1和C2相隔开,疑为隐伏的变质岩体。北区C1与深部热流体相贯通,成为深部高温地热流体向上运移的主通道。在北区深部勘探井的岩芯中可见绿泥石、绿帘石等蚀变矿物,是热储表现为中低电阻率电性特征($10 \sim 200 \Omega\text{m}$)的主要原因。在 $6.2 \sim 14 \text{ km}$ 深度范围存在着一个电阻率小于 $30 \Omega\text{m}$ 的异常体C3,推断为沿着北东向伸展的局部熔融体(图7e~7h),即羊八井地热田的岩浆热源,但C3并不位于C1的

正下方,而是位于C1的北东向(图7).局部熔融体的形成与印度板块持续向北推进有关,宽度约6km,伸展方向与亚东-古露裂谷的走向保持一致。由于MT测点的分布范围有限,目前还无法对局部熔融体的规模进行评估。

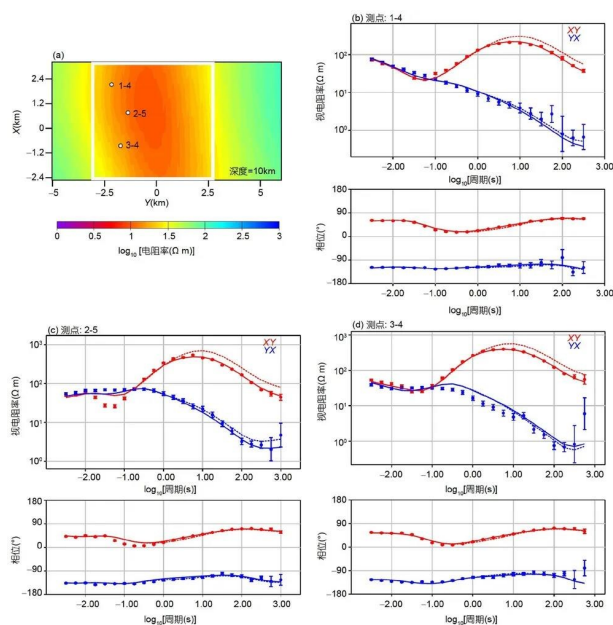


图6 深部低阻体灵敏度测试结果

(a) 检验模型(白色线框将6.2~14km深度范围内的电阻率设定为 $100\Omega\text{m}$);(b)1-4测点视电阻率图(上图)和相位图(下图);(c)2-5测点视电阻率图(上图)和相位图(下图);(d)3-4测点视电阻率图(上图)和相位图(下图)。圆点表示观测数据,实线表示观测数据反演模型响应曲线,虚线表示检验模型响应曲线。

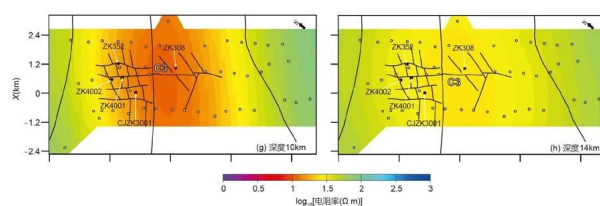
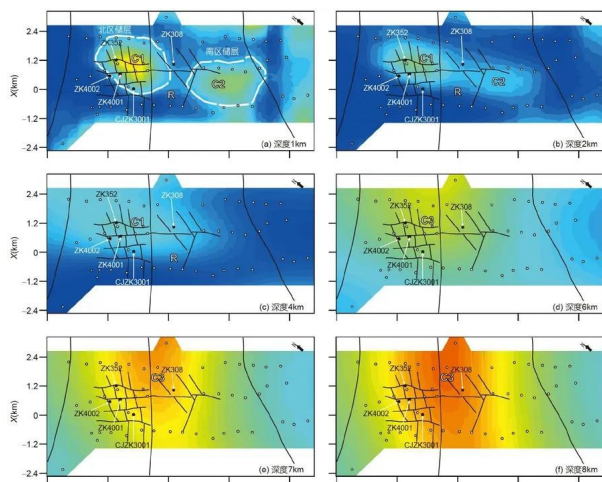


图7 三维电性结构在不同深度的水平切片

白色圆圈表示MT测点,黑色圆点表示地热井,黑实线表示断层,白虚线圈定的是低阻区。

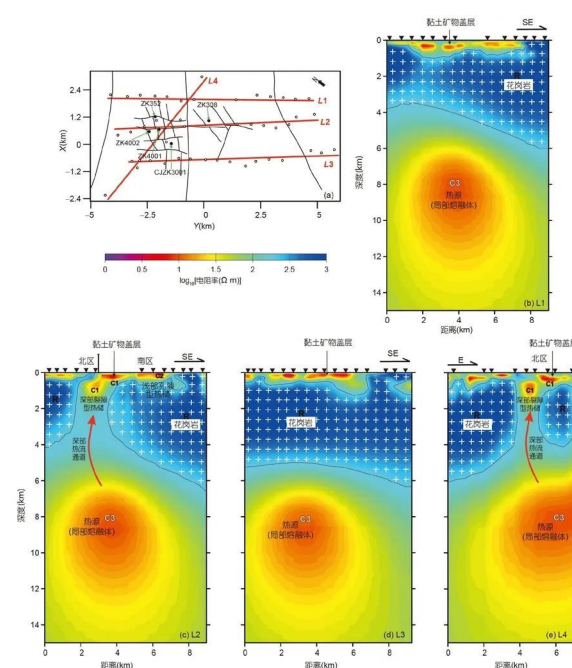


图8 三维电性结构沿MT测线的剖面图

(a)为MT测线分布图,红线表示MT测线,黑线表示断层,黑圆圈表示测点,黑圆点表示地热井。(b)~(e)分别表示L1~L4线,红色箭头表示热流通道.黑色倒三角形表示测点

图8是三维电性结构模型沿着4条MT测线的剖面图.在地下0.5km深处存在着约 $10\Omega\text{m}$ 的低电阻率含水层,那是地热田的浅层热储,大量出现的蒙脱石、玉髓等黏土矿物/蚀变矿物是导致电阻率较低的主要原因。地热田2km以浅的精细化三维电性结构可参见SO-TEM探测结果(陈卫营等,2023)。北区高温地热流体的升流通道表现为开口朝上的喇叭形状,近乎垂直。然而,在2km深度之下,尚未探测到近似层状低阻体(图8e)。

6 地质成因模型

羊八井地热田实测大地热流背景值是 108 mW/m^2 , 地温梯度是 46.5°C/km (沈显杰等, 1992), 超过了全球大陆地区大地热流平均值 67.1 mW/m^2 (Lucazeau, 2019)。羊八井地热田至今没有发现第四纪火山岩, 热源性质、深部热储特征、地热流体升流通道等问题曾经争论了许多年。Hochstein 和 Yang (1995) 提出了羊八井深循环地热水成因模式。但随着 ZK4002、ZK4001 井先后成功揭露出超过 250°C 的地热流体, 国内外同行对该地热田具有岩浆热源的属性已达成共识。氦同位素测定表明, 地热气体中来自地幔的组分约为 3% (赵平等, 2001), 据此可以推断局部熔融体主要是地壳物质组分, 通过深大断裂混入了少量的来自青藏高原地幔楔的流体组分, 与同属亚东-古露裂谷的羊易、古露等高温地热田类似; 有关地幔楔的论述详见 Klemperer 等 (2022)。国际合作项目 (INDEPTH) 研究发现, 在羊八井等地 $15 \sim 20 \text{ km}$ 深度存在着含水的花岗质岩浆层 (Brown 等, 1996), 而这次在地热田中部 $6.2 \sim 14 \text{ km}$ 深度范围内探测到的局部熔融体很可能是来自该岩浆层的上涌。局部熔融体的平均深度是 10.1 km 。综合前人在地热地质、地球物理、地球化学和钻孔测温等资料, 提出了羊八井地热田的地质成因模型 (图 9)。大气降水和冰雪融水沿念青唐古拉山前断裂带向下渗透, 随深度增加而逐步升温, 沿途从围岩中吸取热量, 并淋滤出矿物组分。经局部熔融体烘烤加热后, 地热流体的密度逐渐下降。当地热流体循环到一定深度时, 在冷、热水密度差和地势差的共同驱动下开始沿裂隙向上折返。在上升过程中, 减压气化导致大量气体组分 (主要是 CO_2 和 H_2S) 和地热蒸气从地热流体逃逸, 在升流通道顶部硫磺沟附近形成了大面积的酸性蚀变带, 明矾石、高岭土、蛋白石和玉髓等是热储盖层的主要矿物成分, 同时释放出高通量的 CO_2 。地热流体在升流过程中遇到盖层阻挡后, 受深部压力和浅层冷水顺流的共同驱动, 开始向地热田的东南方向做水平流动, 在北区浅层蚀变花岗岩和南区第四系砂砾岩层内形成浅层热储, 地热流体埋藏深度逐渐减小, 最终在南区形成大面积的溢流区。羊八井地热田深部三维电性结构揭示, 南区既没有地热

流体升流通道, 也不存在深层热储。在北区喇叭状升流通道 2 km 深度以下, 尚未发现富水性良好的层状热储, 这表明羊八井深部岩层的裂隙不够发育, 渗透性较差, 与北区深部热储勘探井的钻探资料比较吻合。前人的地热流体化学组分研究表明, 浅层地热流体是深层地热流体与地下冷水相混合的产物, 冷水混合比例为 $30 \sim 35\%$ 。开发利用深层高温地热流体将加快浅层地热资源的萎缩。由于羊八井北区在 1 km 深度的岩层温度已超过 200°C (廖志杰和赵平, 1999), 菱块状断裂发育, 因此在地热尾水回灌过程中, 可以借鉴美国 Geysers 地热电站的成功经验, 应用水力压裂等多种方法 (EGS) 在深部高温岩体人工扩大热储的规模, 通过增加地热水深循环范围和流量进一步扩大产能, 实现地热能的高效开发利用。

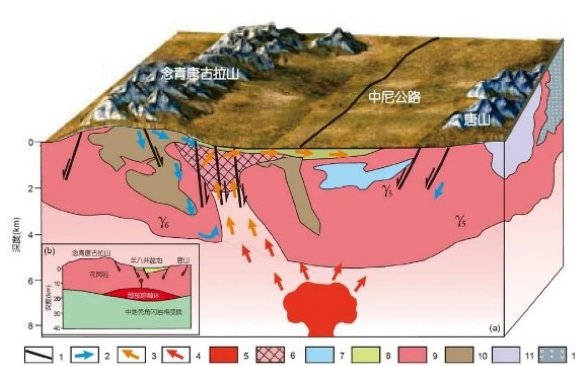


图9 羊八井地热田地质成因模型(a)及念青唐古拉花岗岩侵位与伸展构造图(b)

(a)修改自赵平等 (2001)。图例中 1 表示断层; 2 表示温水运移方向; 3 表示热水运移方向; 4 表示岩浆热能传导方向; 5 表示岩浆热源; 6 表示裂隙型热储; 7 表示富水区, 推测其温度低于浅层热储 (详见陈卫营等 (2023)); 8 表示第四系孔隙型热储; 9 表示花岗岩; 10 表示前寒武纪变质岩; 11 表示白垩系; 12 表示新生代火山岩。

7 结论

羊八井地热田局部熔融体位于地热田中尼公路的下方, 埋藏深度是 $6.2 \sim 14 \text{ km}$, 沿北东向伸展。升流通道位于北区的硫磺沟, 为开口朝上的喇叭形状。地热流体上升至浅层热储遭遇黏土矿物盖层阻挡后, 在深部压力和浅层冷水顺流的共同驱动下

转折为自西北向东南方向的水平流动,最终在地热田南区溢出。南区 2km 深度以下不存在低阻体。北区 2km 深度以下的岩石裂隙不够发育、渗透性较差,尚未发现富水性较好的层状热储。深层高温地

热资源的开发利用将加快浅层资源的萎缩,应用水力压裂等多种方法(EGS 技术)扩大深部高温热储的规模将是羊八井地热田扩大产能的重要途径。

转自《中国科学:地球科学》No. 53 No.8

第十九届中国可再生能源大会地热能分会在西安隆重举行

中国可再生能源学会地热能专委会 报

8月16日下午,第十九届中国可再生能源大会地热能分会在古都西安隆重开幕。大会由中国可再生能源学会主办,地热能专委会承办,中建丝路建设投资集团、陕西省地热协会、自然资源部浅层地热能重点实验室、自然资源部页岩气资源战略评价重点实验室、保定顺昌钻井工程有限公司等5家单位协办,中国地质调查局浅层地温能研究与推广中心、中国能源研究会地热专业委员会、中国地球物理学会地热专业委员会、中国地质学会地热专业委员会、中国矿业权评估师协会等多家行业学会、科研院所支持。

中国科学院院士汪集暘,大会主席、国际地热协会理事、中国可再生能源学会会士刘久荣,原自然资源部矿产资源保护监督司司长、中国矿业权评估师协会负责人鞠建华,中国能源研究会地热专业委员会主任田廷山,应急管理部国家自然灾害防治研究院副院长胡杰,中国地质调查局水环中心党委书记、俄罗斯自然科学院外籍院士张发旺,中国科学院地质与地球物理研究所研究员、中国地球物理学会地热专业委员会主任庞忠和,中国地质科学院水环所研究员、俄罗斯自然科学院外籍院士王贵玲,中国地质科学院岩溶地质研究所首席科学家、俄罗斯自然科学院外籍院士蒋忠诚,山东省地热能勘查开发研究院院长、泰山学者特聘专家、自然资源部科技领军人才、俄罗斯自然科学院外籍院士康凤新,中国地质大学(武汉)工程学院副院长、教授、俄罗斯自然科学院外籍院士窦斌,长江学者、国家优青、清华大学土木水利学院副院长刘晓丽、北京市地质矿产勘查院副院

长黄学勤、陕西省地质调查院党委书记黄建军、北京市科学技术研究院副院长卫万顺、中国地质调查局浅层地温能研究与推广中心主任李宁波、北京市发改委新能源处领导周长宽、雄安新区管理委员会自然资源和规划局李红英、中国石油勘探开发研究院教授闫家泓等多位知名领导学者专家齐聚一堂。

吸引了来自中国科学院、自然资源部等知名学者,中国能源研究会、中国地球物理学会、中国地质学会、中国矿业联合会、中国矿业权评估师协会、陕西地热协会、安徽地质学会等学会代表,中国地调局、北京地勘院、天津地矿局、河北地矿局、甘肃地勘局、安徽地矿局、陕西地调院、雄安新区等省局领导,清华大学、中科院、地科院、中国地质大学、西安交通大学、河北地质大学、天津大学、哈尔滨工业大学、山东建筑大学、西北大学、东北大学、长安大学、郑州大学、河北工程大学、天津科技大学、扬州大学等大学教授,中石油、中石化、中核汇能、北投集团、北控集团、兵装集团、上海地矿集团、陕煤集团、陕煤地质集团、山西地质集团、华能集团、河北地矿集团、中船重工集团、皖能集团等国央企代表等300余位地热之友参加了此次大会。

会议期间,开幕式、特邀报告、学术专访、专著签送、项目考察、企业展览和墙报交流等一系列丰富多彩的活动接踵而至。这不仅为参会人员提供了宝贵的学习与交流机会,也为参会企业展示最新成果、扩大影响力提供了绝佳平台。此次大会为地热能产业的蓬勃发展注入了强劲动力,必将在推动地热能技术创新和行业发展的进程中起到

至关重要的作用。

16日下午茶歇期间,专委会精心策划了一场别具一格的活动,掀起了现场的高潮。六位业内顶尖专家——庞忠和、李宁波、戴传山、康凤新、窦斌、卫万顺——携手奉上他们的珍贵专著,带着亲笔签名,现场赠书。参会者们热情高涨,争相排队领取这一份份珍贵的心血结晶,整个活动现场充满了知识与敬意的氛围。

17日上午报告分别由闫家泓和马静晨主持。中国地质调查局水环中心党委书记张发旺做题为《矿山煤(矿)-热协同开采与多能互补研究》的报告、中国地质科学院岩溶地质研究所首席科学家蒋忠诚做题为《我国岩溶碳汇的潜力及技术途径》的报告、清华大学建筑设计研究院水利水电分院院长王恩志做题为《干热岩开发中花岗岩热力耦合破损机理研究》的报告、中国科学院广州能源研究所地热能研究室主任龚宇烈助理做题为《基于深部含水层储能的地热供暖技术》的报告、中国矿业权评估师协会秘书长杨雪松做题为《矿业权评估师职业资格制度与2024年矿业权评估师职业资格考试》的报告、中国地质大学(北京)教授张金川做题为《中国地热发展历史机遇与技术挑战》的报告、中国科学院武汉岩土力学研究所教授白冰做题为《中深层地热开发新方法与新技术研究》的报告、安徽省地质环境监测总站教授官煜做题为《浅层地热能的热冷双供优势》的报告、北京市地质矿产勘查院矿产资源部副主任李翔做题为《科技创新驱动浅层地热能行业高质量发展》的报告、中国地质大学(北京)教授李克文学生代做题为《热发电新技术及应用进展》的报告。

17日上午报告分别由西安交通大学蔡皖龙和郑州大学黄奕斌主持。天津科技大学海洋与环境学院院长邓天龙做题为《地热卤水中稀散元素提取及其高值化利用技术》的报告、中核(西藏)能源发展有限公司地热项目执行经理魏凯做题为《中核西藏谷露高温地热发电项目进展及规划》的报告、安徽省勘查技术院副院长兼总工程师熊强青做题为《地热综合地球物理勘查方法技术与应用》的报告、哈尔滨工业大学教授倪龙做题为《工业园区复合型中深层地埋管地源热泵供热系统优化研

究》的报告、东南大学教授张国柱做题为《隧道地热能开发与应用研究》的报告、东北大学教授韩宗伟做题为《地埋管地源热泵埋管换热参数精确辨识及埋管长度确定方法研究》的报告、扬州大学教授杨卫波做题为《地埋管换热器能效提升关键问题研究》的报告、华中科技大学副教授罗勇强学生代做题为《中深层地埋管分段优化设计方法研究》的报告、中山大学副教授游田做题为《复合能源地下结构热力耦合性能研究》的报告、长安大学江超做题为《中深层地热能快速计算模型及软件平台》的报告、西安交通大学蔡皖龙做题为《中深层地热耦合储热建筑供热系统动态特性研究及能量分析》的报告、北京市地质矿产勘查院工程所刘哲做题为《光纤实时传输技术在地温场监测中的应用》的报告。

18日上午,专委会组织参会专家领导参观考察了中国石化新星绿源陕西公司渭水曲项中深层地热供暖能源站,该能源站于2018年建成并投入使用,此站供暖能力可达20万平方米,现供暖面积5.4万平方米,由在小区后边钻凿的1口地热生产井提供热源,同时配备一口回灌井。两口井深分别3000米,通过用潜水泵将80°左右高温地热水从井内抽出,通过管道输送此换热站内。根据现有5.4万的供暖面积,此生产井暂时不需要满负荷运转足以满足供暖需求,采暖季平均每小时提取量为38方左右,已平稳运行5个采暖季,整体运行状况良好。地热替代燃煤锅炉集中供暖,每年可节约标准煤5591吨,减少二氧化碳排放15486吨,为节能减排、防污治霾做出了显著贡献。

本次地热能分会通过汇聚多方专家智慧,分享前沿科研成果和成功项目经验,为地热能产业的发展注入了新的活力。大会不仅在学术层面展示了地热能开发的最新进展,还为产业界提供了更多的合作机遇。特别是项目考察环节,展示了地热能在实际应用中的高效性与可持续性,彰显了地热替代传统能源在节能减排中的巨大潜力。此次大会的成功举办,标志着地热能技术在中国的不断突破与发展,将推动地热产业加速迈向规模化应用,并助力“双碳”目标的实现,为可再生能源的广泛应用奠定了坚实基础。