doi: 10.11720/wtyht.2026.1378
徐坤, 王晨, 郑向光. 综合物探方法在佛坪穹隆地热勘探中的应用[J]. 物探与化探, 2026, 50(2): 236-248. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1378
Xu K, Wang C, Zheng X G. Application of comprehensive geophysical exploration technology in geothermal exploration of the Foping dome[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(2): 236-248. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1378

综合物探方法在佛坪穹隆地热勘探中的应用

徐坤, 王晨, 郑向光
(陕西地矿第二综合物探大队有限公司, 陕西 西安, 710016)

摘 要: 陕南佛坪地区为地热空白区, 为探测穹隆深部构造特征、地层结构, 初步圈定地热水富集范围, 布置了广域电磁测深(WFEM)和土壤氡气测量剖面, 通过野外数据采集、处理和反演, 获得了工作区内 4 000 m 以浅的电性结构特征, 提出了佛坪地区新的认识: 由 NW 向 SE 方向多重推覆, 北段逆冲, 南段下滑, 总体构造样式为以佛坪县城为中心的背形构造; 深部存在连续分布的低阻异常带, 这与底板滑脱断裂、岩体侵入时中边部形成的断裂破碎带相关, 这些断裂为地下水的向下运移和储存创造了条件, 推覆岩片叠加过程中, 岩片间裂隙较为发育, 大理岩、石英岩等脆性岩石形成的孔、洞、裂隙等形成了地热水赋存的空间。结合当地产业规划、经济发展、道路条件等客观因素, 在佛坪县城以北 2.5 km 椒溪河西岸的长角坝镇教场坝村布设钻探工作, 完钻井深 2 002 m, 成功打出了水温 35 ℃、392 m^3/d 的地热水。打破了佛坪穹隆不含水或含水量少的传统理念, 为该地区地质构造特征、水文地质条件研究获得了切实的实物资料, 也为基础地质理论研究提供了可靠的依据。

关键词: 佛坪; 深部构造; 广域电磁法 (WFEM); 地热; 多重推覆
中图分类号: P631.4; P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)02-0236-13

0 引言

佛坪县作为革命老区, 境内旅游资源丰富, 如熊猫谷、秦岭国宝旅游度假区、老街、人与自然博物馆、茶荚谷、红二十五军旧址等, 如能进一步勘探开发地热资源, 将进一步为佛坪县生态农业、生态康养、医疗保健、温泉洗浴和旅游度假等产业转型升级注入新动力。传统地质观念认为佛坪地区为热穹隆[1-7] 或隆—滑构造[8-10], 发育大规模的原地侵入体, 深部很难有储水空间; 另有少部分认为佛坪穹隆为推覆构造, 即佛坪岩群变质岩非原地地质体, 各岩片之间为断层接触, 且多重推覆岩片之间具有水平断层, 具容储水空间。在此基础地质问题影响区域找热水资源的情况下, 2020 年我们进行了试验剖面测量以及初步地质调查, 认为佛坪岩群“无根”, 表现为推覆构造特征, 具有一定的地下热水赋存条件。随后于 2002~2004 年开展了进一步的地热勘探工作。

地球物理勘探是探测深部地热资源的重要手段, 主要用于划分地层结构、推断断裂构造、圈定地热异常区, 从而为钻探施工提供依据。1991 年, 国家地震局地球物理勘探大队在洛阳、晋南地区开展了大比例重磁面积测量、放射性测量、地温测量等工作[11], 推断了断裂构造位置和地热田分布情况, 并根据物探异常在新绛县刘峪村布设了地热钻孔, 出水温度达 61 ℃; 2021 年长安大学在安康石泉地区采用磁法、激电测深、地温和可控源音频大地电磁测深等综合物探技术[12] 划分了基底断裂和潜在地热赋存远景区, 给出了钻孔建议; 2018 年吉林大学采用重力、航磁、大地电磁测深(magnetotelluric sounding, MT)和可控源音频大地电磁测深(controlled-source audio-frequency magnetotellurics, CSAMT)在伊通盆地进行了地热资源勘查, 在地热远景区进行了钻探验证, 完钻井深 2 300 m, 井口温度 61 ℃[13]; 2020 年江西省地质矿产勘查开发局物化探大队[14] 在宜春地区采用高密度电法和广域电磁法(wide-field electro-

收稿日期: 2025-10-16; **修回日期:** 2026-01-22
基金项目: 陕西省自然资源厅、陕西省财政厅 2022 年地质勘查专项资金项目“陕西省佛坪县地热资源调查”(陕地勘金字〔2022〕35 号); 陕西地矿集团科研专项资金项目“陕南地热资源勘查方法有效性集成研究”(陕地科金〔2024〕07 号)
第一作者: 徐坤(1988-), 男, 高级工程师, 硕士研究生, 主要从事地球物理勘查与研究工作。Email: 1047496556@qq.com

magnetic method, WFEM)开展了地热勘探, 经钻探验证, 成果较为突出。为探测江苏泗洪县柳山湖景区的深部地热构造, 汪名鹏[15]采用音频大地电磁法(audio-frequency magnetotellurics, AMT)确定了构造低阻异常的中心范围, 为地热钻孔位置选取提供了地球物理依据。

广域电磁法[16-18]是何继善院士在可控源基础上, 采用适合全域的公式计算视电阻率, 通过发射伪随机信号, 对地下介质进行勘探的一种方法, 具有勘探深度大、抗干扰能力强、精度高等优势, 近年来在深部资源勘探中得到了很好的推广。本次采用广域电磁和土壤氡气测量相结合划分地层结构、断裂构造, 进一步分析了佛坪穹隆地热地质条件, 最终取得了很好的应用效果。

1　区域地质背景

佛坪地区处于秦岭造山带的蜂腰部位, 是东、西秦岭交接的关键地带, 北部紧邻商丹带, 南接勉略带(图 1), 是秦岭造山带中独特的、具有重大科学意义的复杂构造位置。秦岭地壳厚度、卫星重力异常、地震层析成像等特征明显不同的 108°E 分界线从本区经过, 因此该区也是东、西秦岭反向推覆构造交接变化的挤压剪切转换部位, 是秦岭造山带中独特的、具重大科学意义的穹隆。

陕西地质志以及公开的多数基础研究均将该区划为古隆起。该古隆起由佛坪岩群、龙草坪岩套和长角坝岩群组成(图 2)。佛坪岩群以一套石榴黑云斜长片麻岩—刚玉黑云钾长片麻岩—斜长角闪岩组合为主, 龙草坪片麻岩套为角闪斜长片麻岩—黑云斜长片麻岩组合, 包括滴水岩组(Ar_3d)、南沟岩组(Ar_3n)和温泉岩组(Ar_3w)。二者呈近圆形弯状出露于隆起的核部。过渡性基底长角坝岩群为一套低角闪岩相变质程度的层状沉积岩组合, 包括低庄沟岩组 ($Pt_{2\text{-}3}Cd$)、黑龙潭岩组 ($Pt_{2\text{-}3}Ch$)、沙坝岩组 ($Pt_{2\text{-}3}Cs$)。另外, 在佛坪岩群和长角坝岩群之间少量产出九关沟组(Pt_2j)角闪片岩, 成透镜构造体产出, 从现有结构、构造很难判断其原岩特征[20]。

区内岩浆岩分布于佛坪县城、王家湾一带, 形成于扬子板块和秦岭微板块碰撞的晚期阶段, 与板块的碰撞造山作用有关。基本岩性为黑云二长花岗岩, 中细粒结构, 岩体韧性变形微弱,构造片理不发育, 主要以脆性断裂和碎裂作用为主。侵入体中除含有一定量的老岩层捕掳体外, 尚有部分深源基性包体。

褶皱构造主要为龙草坪背形、长角坝向形和佛坪背形, 均为基底抬升和南北挤压条件下变形的复合构造。其中龙草坪、佛坪背形为穹隆状构造, 翼部出露为长角坝岩群, 核部出露结晶基底为片麻岩系。佛坪地区发育一些近 EW 向的高角度走滑剪切带、走滑断层以及剥离断层。这些断裂为地热的热交换提供了良好的通道和空间条件。

该区地下水的形成、赋存与分布主要受气候、地层岩性、地质构造和地形地貌等因素的控制。其中起主导作用的是气候和岩性, 气候因素主要控制地下水的形成, 岩性因素主要控制地下水的赋存与分布。本区地处秦岭山区, 总的来看, 大理岩分布区富水性较好; 在石英岩、石英片岩、变粒岩分布的基岩山区, 为弱富水; 在第四系、片麻岩、花岗岩分布的基岩山区, 地下水较贫乏。

2　岩石物性特征

统计了工作区不同岩性露头和标本测量的电性特征, 见图 3。露头测量工作是在新鲜岩石界面上, 使用岩样测试仪, 用小四极装置(*AB*=90 cm, *MN*=30 cm, 供电周期 32 s)测量, 最后根据装置系数、供电电流、电压计算露头电阻率值。岩性标本测量前进行了 24 h 的浸水饱和, 擦干表面后, 用黏土加少量的硫酸铜作接触介质开始测量, 供电电压 9 V, 供电周期 32 s, 最后根据标本尺寸、供电电流、电压等参数计算标本电阻率值。

将整个工区岩性分为 3 类:侵入岩, 包括花岗岩、闪长岩; 正变质岩, 包括斜长角闪片麻岩、花岗片麻岩; 副变质岩, 包括大理岩、石英片岩、片岩、石英岩等。每种岩性标本和露头数量均大于 30 块(处)。统计时, 对异常值进行剔除后进行几何平均值计算。电阻率值整体特征为: 露头测量>标本测量, 侵入岩、正变质岩>副变质岩; 副变质岩中, 石英片岩电阻率值较低, 石英岩介于大理岩和片岩之间; 大理岩、石墨大理岩基本相当, 完整的大理岩电阻值通常较高, 露头测量多在 4 000 Ω·m 以上, 但在破碎含水处, 露头电阻率值迅速降低至数百至数十欧姆, 说明含水与否对电阻率影响较大。

结合反演电阻率、标本测量、露头测量结果, 工作区电性特征如下: 侵入岩、正变质岩表现为高阻, 电阻率值通常大于 1 000 Ω·m, 受构造影响片理、裂隙发育时, 电阻率值有所降低; 副变质岩普遍呈中低阻, 受构造裂隙和水影响较大, 富水时电阻率值极低, 降至数 10 Ω·m。岩石完整、不含水或弱含水时,

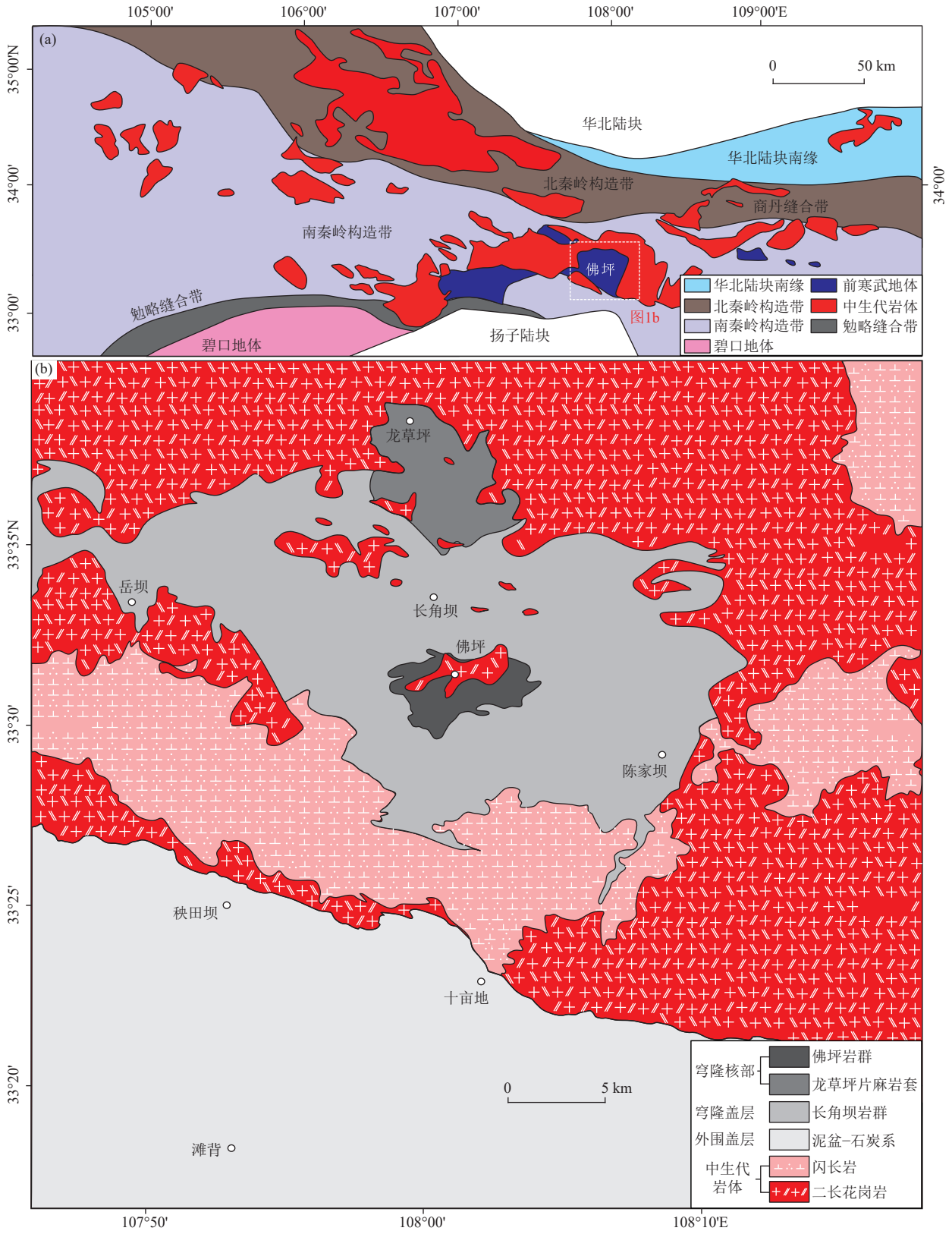


图 1　秦岭造山带大地构造简图 (a) 与佛坪地区地质简图 (b)(据参考文献 [19] 修改)

Fig. 1　Schematic of tectonics of the Qinling Orogenic Belt(a) and geological of Foping area(b)(modified according to reference[19])

多呈中高阻, 电阻值率值在 100 Ω·m 以上。

综上所述, 工区内各类岩石及主要构造层之间存在着较为明显的电性差异, 为在区内开展物探资料解释提供了基础, 也为在区内开展地球物理勘查提供了良好的条件。同时, 由于地下情况千差万别, 目前采用的任何测量和统计方法, 得到的各类物性

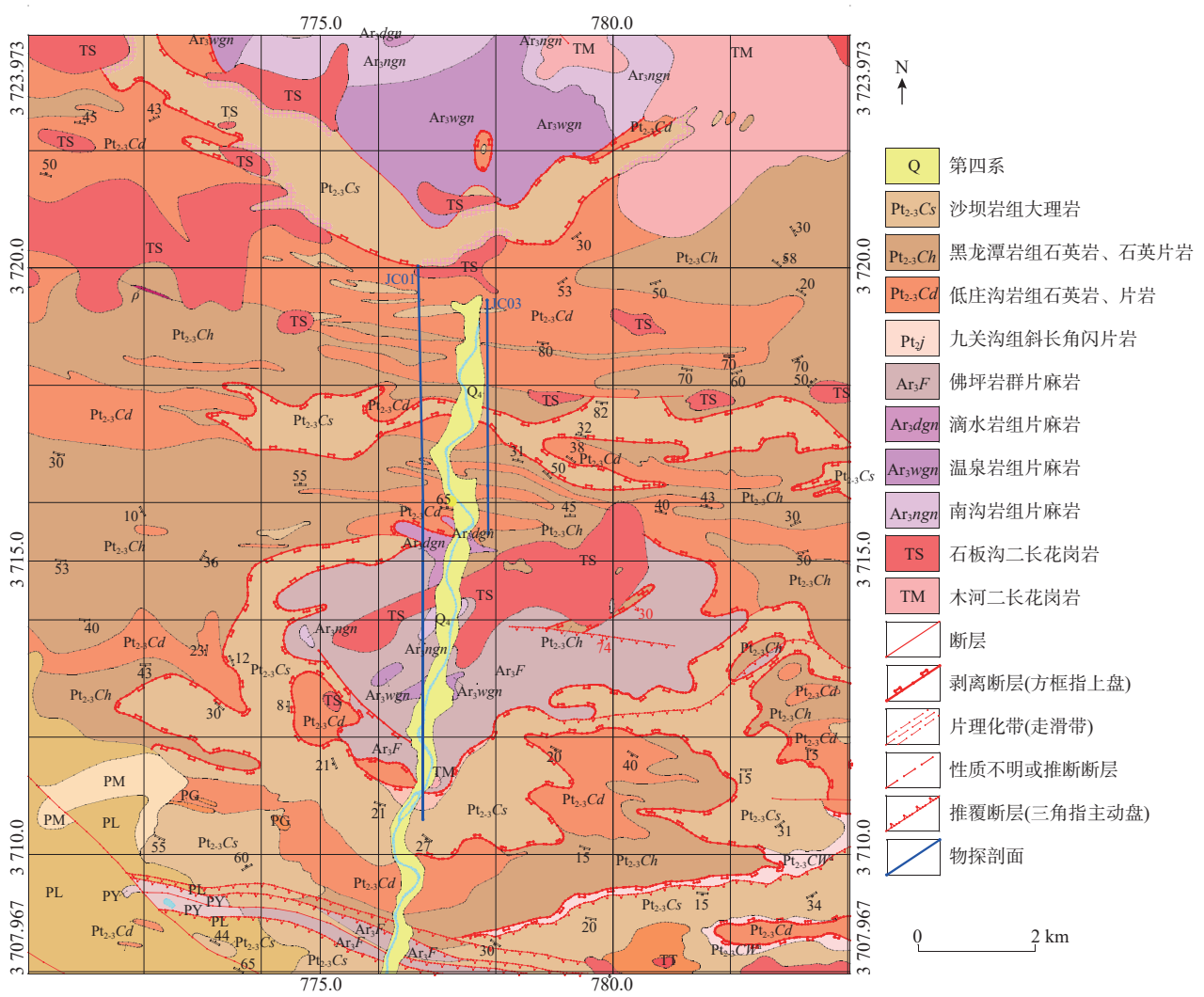


图 2　工作区地质概况

Fig. 2　Geological overview of the work area

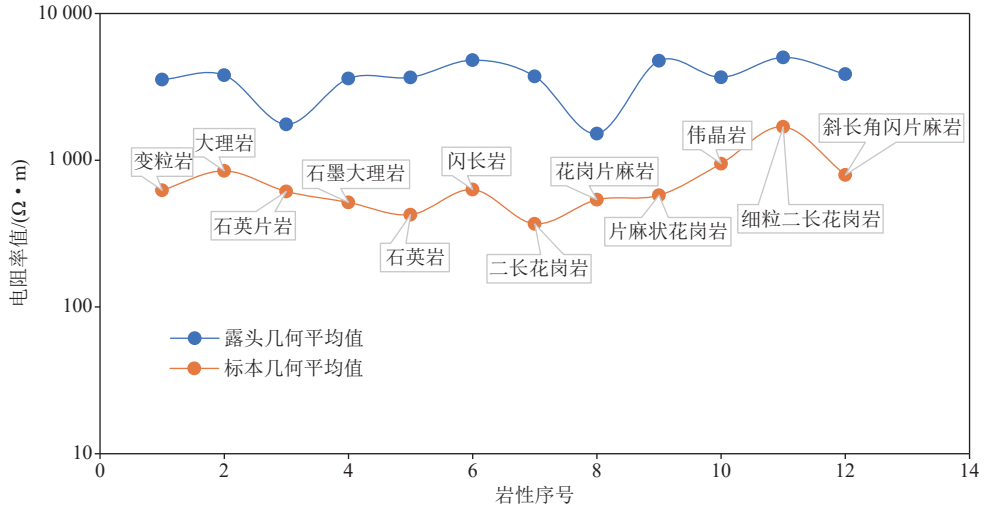


图 3　岩(矿)石电性参数露头和标本测量对比

Fig. 3　Comparison of rock (ore) electrical parameters outcrop and specimen measurements

统计值均只是一个地区的宏观控制数字, 而实际上物性参数在纵向上或横向上都会存在差异。因此, 在工作中除对物性资料选用合理的统计方法外, 在使用时还要因地制宜的进行调整。

3　数据采集与处理

广域电磁法继承了可控源音频大地测深的优点，同时克服了大地电磁法随机性、信号弱的缺点，根据曲面波方程，采用严格的全区视电阻率公式，不作简化，提取视电阻率数据。

水平电流源在均匀半空间下，大地表面的电场 E_x 分量表示为：

$$E_x = \frac{IdL}{2\pi\sigma r^3}\left[1-3\sin^2\phi+\mathrm{e}^{-\mathrm{i}kr}(1+\mathrm{i}kr)\right], \quad (1)$$

式中：ϕ 代表观测夹角；I 代表供电后电流强度；dL 为电偶极子长度；r 为收发距；i 为纯虚数；k 代表均匀半空间的波数；σ 为电导率；

根据式(1)，得到视电阻率公式如下：

$$\rho_a = K_{E-E_x}\frac{\Delta V_{MN}}{I}\frac{1}{F_{E-E_x}(\mathrm{i}kr)}, \quad (2)$$

在上式中：

$$K_{E-E_x} = \frac{2\pi r^3}{\mathrm{d}LMN}, \quad (3)$$

$$F_{E-E_x}(\mathrm{i}kr) = 1-3\sin^2\phi+\mathrm{e}^{-\mathrm{i}kr}(1+\mathrm{i}kr), \quad (4)$$

$$\Delta V_{MN} = E_x MN, \quad (5)$$

式(2)为广域电磁视电阻率的计算公式，该公式适用于波区和非波区，对比可控源音频大地电磁测深，在同样的收发距下能够取得更大的勘探深度[18]。

地壳中的氡气(^{222}Rn)主要由岩石中铀、钍元素衰变产生，当断裂破坏岩层后，岩石射气性增强，局部由封闭转为非封闭状态，同时断裂带内渗透性强、地层破碎，形成氡气运移和富集的通道。氡气经地温差、对流、扩散等作用沿断裂带向上运移，在地表土壤层中形成氡气异常，其异常位置可大致反映隐伏断裂带在地表的出露位置，异常值与背景值的差值能反映断裂活动强度，差值越大活动性越强[21-23]。

野外数据采集是后续资料处理、解释的基础。本次数据采集采用湖南继善高科技有限公司研制的广域电磁观测系统 (图 4a) 以及北京核地科技发展有限公司研制的 FD216 型 RaA 测氡仪 (图 4b)。其中广域电磁观测系统主要设备有：广域电磁发射机、广域电磁接收机、大功率发电机等。

根据工作区地质构造特征，共布置广域电磁 SN 向剖面 2 条，编号分别为 JC01、JC03(图 2)，剖面长度分别为 8.7 km、4.8 km，测点距 100 m，剖面线距 1.1 km，探测深度 4 000 m；土壤氡气测量剖面 2 条，编号分别为 WD1、WD3，分别与 JC01、JC03 剖面中间段重合。

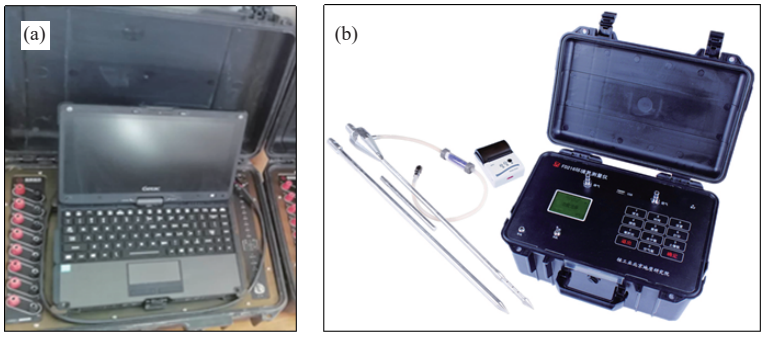


图 4　广域电磁接收机(a)和土壤测氡仪器 (b)

Fig. 4　Wide area electromagnetic receiver (a) and soil radon measurement instrument(b)

广域电磁采集 1、3、5、7、9、11 共计 6 个频组数据，频点 40 个，范围为 8 192～0.011 7 Hz。为保证勘探深度和压制干扰信号，在每条测线施工前分别进行了信号和天然场对比试验。从图 5 可以看出，广域电磁信号曲线光滑连续，具有独立性，天然场信号不规律，锯齿状跳跃，信号场能够有效压制干扰，证明场源信号覆盖强度可行。

广域电磁野外数据采集系统可以实时查看曲线和各频点均方误差等参数，当干扰较大时，可通过叠加观测次数尽可能减小噪声的影响。完成最终数据采集后，可根据发射电流、发射坐标、接收的电极坐标和实测的电场强度等计算广域视电阻率。

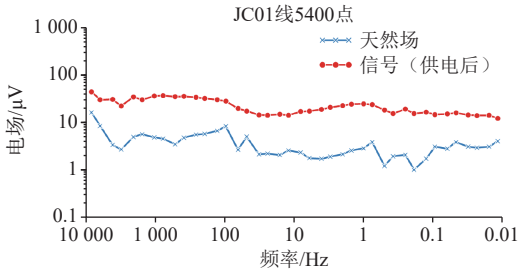


图 5　JC01 线 5400 点天然场和信号对比

Fig. 5　JC01 line 5400 points natural field and signal comparison

数据预处理是资料反演解释的重要环节。观测到的原始数据通常包含仪器、天然电磁、人文等干扰。前人在去噪方面做了大量的研究工作[24-26], 这些为后续数据反演奠定了基础。通过曲线编辑、去除“飞点”、圆滑等手段, 对受干扰大、噪声强的数据做合理的处理。静态校正[27-28] 主要通过空间滤波进行处理。反演软件使用 GME_3DI, 深度取 4 km, 频率范围 8 192~0.1 Hz,以一维反演结果作为初始模型, 最终在二维反演的基础上成图解释。

土壤氡气测量包括计算平均值及标准差, 通过对采集的数据进行数理统计分析, 根据异常特征划分相对异常带。首先用算术平均值法确定每条测线的背景值 R, 计算公式如下:

$$R=\frac{\sum_{i=1}^{n}X_i}{n},$$

式中:X_i 为各测点的数值, 单位为 Bq/m^3; n 为参加统计的总点数。

其次, 计算每一条测线上各测点测值的均方差:

$$\delta=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-R)^2}{n-1}}。$$

土壤氡气异常下限计算公式为$d=R+\mathrm{K}\delta$, 通过对本区实测数据的分析, 确定常数 K=2, 异常下限取 $R+2\delta$。

4　剖面解释

4.1　解释依据

1)对于具有一定规模的层间水或裂隙水赋存部位, 由于含水地层表现为明显的低阻特征, 可根据这一特征精确划定地下水赋存部位、规模及其连通性。

2)岩石地层的电阻率与自身性质和赋存物质有关。厚层、稳定、岩性单一的岩层反映在电阻率断面图上为稳定的电性层; 薄层、变化大、不均匀的岩层反映在电阻率断面图上为透镜体状的电性层; 松散的副变质岩孔隙度大、含水性强, 电阻率值低于致密副变质岩; 富水破碎带通常表现为低阻; 大理岩电阻率值中等或偏高, 但在破碎带或含水位置电阻率值会明显降低; 正变质岩与侵入岩电阻率值为高阻。

3)当电阻率等值线在小范围内有明显梯度变化或某一处两侧电阻率存在明显差异, 可解释为岩性界面或断层接触。

4)断裂构造是深部氡气汇集和迁移的主要通道, 氡气沿断裂向上迁移, 在地表浅部形成氡异常。土壤氡气异常可揭示隐伏断裂构造的位置、产状和活动性。

5)为了进一步揭示各剖面二维反演的电阻率断面所显示的地层分布特征和岩性特征, 结合地质资料、氡气测量、物性资料等对地质综合解释提供依据和约束。

4.2　地层和构造划分

根据物性、断裂划分标志对 JC01 剖面进行了综合解释。从地质剖面来看, 南部主要出露侵入岩和正变质岩, 北部主要出露副变质岩。

由图 6 知, JC01 剖面南部(点号 100～5 000 段): 地表～标高−500 m, 广域电磁反演电阻率为 200～3 000 Ω·m 之间, 表现为相对高阻, 结合地表出露情况和物性统计结果, 反映了正变质岩的电性特征, 向下延伸有限, 厚度在 800～1 300 m 之间, 推测上部侵入岩、正变质岩等弱含水或不含水。标高 200～−2 400 m, 发育“向形”低阻体, 中间厚, 两端薄, 低阻条带中心电阻率在 10 Ω·m 以下, 最有可能由于岩石较破碎, 含水量较高造成的, 推测为大理岩或石英片岩等副变质岩, 岩块孔隙度高或溶蚀破碎充水。中低阻层之下, 电阻率值逐渐升高, 推测发育正变质岩、侵入岩,起隔水作用。点号 5 000～8 000 段: 电阻值整体呈中低阻, 电阻率值多在 100 Ω·m 以下, 最小电阻率值小于 10 Ω·m, 呈紧闭褶皱状, 根据地表出露岩性主要为大理岩等副变质岩, 推测深部为多重推覆叠加的大理岩, 岩块孔隙度高或溶蚀破碎充水。点号 8 000～8 700 段: 整体呈中高阻, 电阻率值多在 100 Ω·m 以上, 推测发育片麻岩、侵入岩等。

该剖面电阻率等值线横向上变化较大, 在 1 300～1 600、3 200～3 500 号点附近, 电阻率曲线在横向上表现为梯级异常带, 推测分别发育正断层 $TF_{3\text{-}2}$(倾角约 40°)、$TF_{4\text{-}2}$(倾角约), 倾向南, 分别延伸至高阻体、低阻体之上。4 400 号点附近, 电阻率表现为明显的突变, 上盘发育二长花岗片麻岩, 下盘发育花岗闪长岩, 推断发育逆断层 $TF_{4\text{-}1}$, 倾角约 50°, 倾向北, 向南逆冲, 终止于低阻带之上。5 800～6 000 号点附近, 电阻率曲线在横向上表现为梯级异常带, 中部呈斜向上冲趋势, 推断发育逆断层 $TF_{3\text{-}1}$, 倾角约 50°, 倾向北, 终止于标高−900 m 左右, 且有氡气高浓度异常明显。在 $TF_{3\text{-}1}$ 断裂之下, 电阻率断面图出现台阶式陷落, 低阻层向深部延伸,电阻率等值线出现“漏斗”状扭曲等特征, 推测发育隐伏正断层(f_1), 向南陡倾。6 400～6 600、7 600～7 800 号点附近, 推测发育逆断层 F_2(倾角约 60°)、$TF_{2\text{-}1}$(倾角约

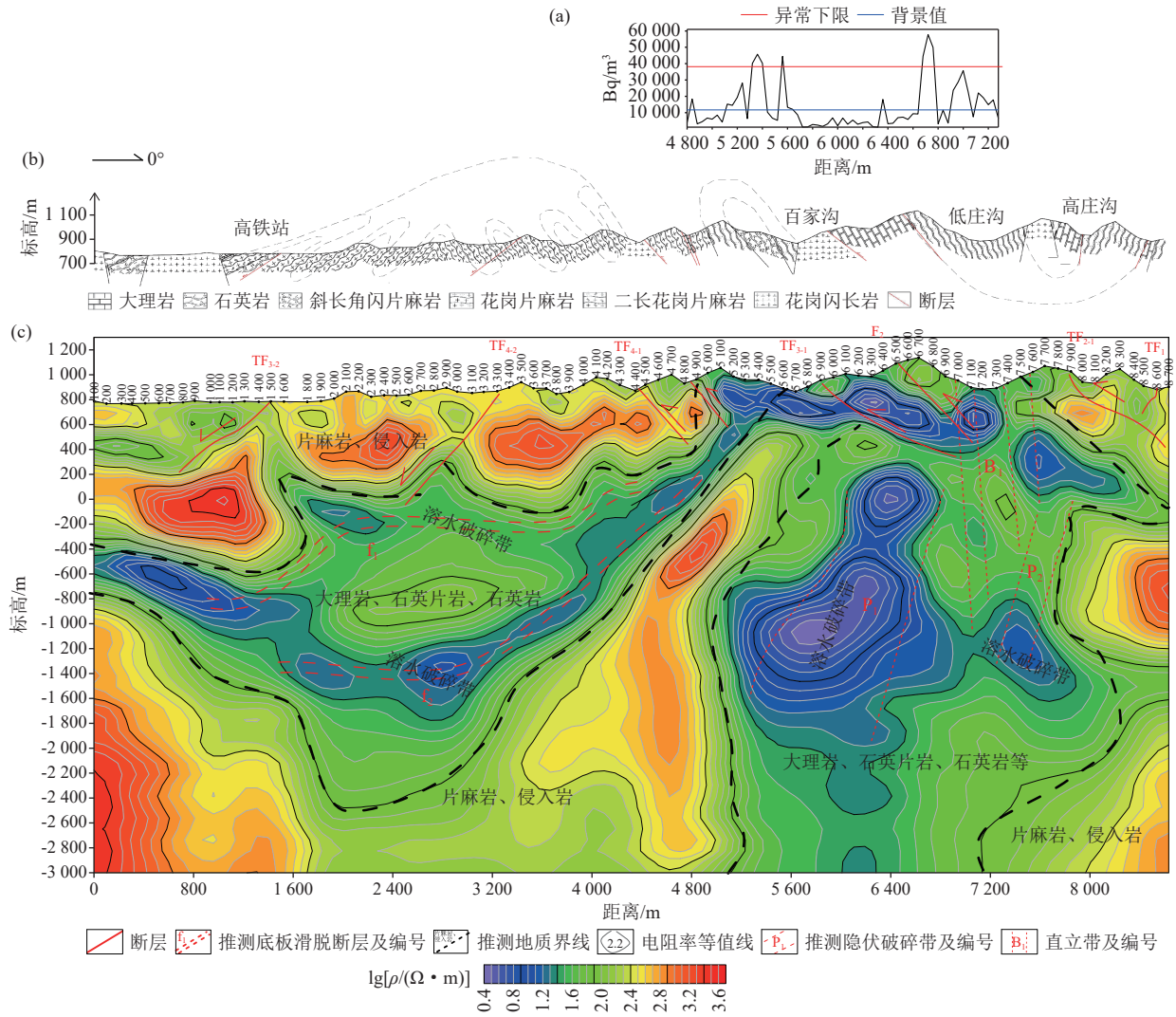


图 6　JC01 剖面综合推断解释

Fig. 6　Comprehensive inference and interpretation of JC01 profile

65°), 倾向北, 且在 F_2 断裂附近氡气浓度异常明显。8 600 号点附近, 推测发育正断层(TF_1), 倾角约 65°, 倾向南, 规模较小。点号 100～5 000 号点之下, 标高 −600～150 m、−1 400～200 m 表现为明显的电阻率低值异常带, 分别推测为底板滑脱断裂 f_1、f_2, 向南逐渐收敛呈水平状。点号 5 500～6 700、标高 300～−2 000 m 之下和点号 7 600～780、标高 0～−1 200 m 之下, 表现为向南倾斜的条带低阻异常, 推测发育破碎带 P_1 和 P_2, 岩石破碎, 节理、裂隙发育。

JC03 与 JC01 剖面结构类似 (图 7), 剖面南部(0~1 800 m), 在纵向上, 整体表现为高—中低—高的特点: 地表~标高 0 m 为相对高阻层, 电阻率在 200～3 000 Ω·m 之间, 垂向厚度在 700～1 100 m 之间; 标高 0～−2 000 m, 发育“向形”低阻体, 中间厚, 两端薄, 电阻率值普遍小于 100 Ω·m, 最小电阻率在 10 Ω·m 以下; 中低阻层之下, 电阻率值逐渐升高, 电阻率最高值达 1 000 Ω·m 以上。剖面距 1 800～4 100 m, 在纵向上, 整体表现为低阻特征, 被中间中阻体隔开, 电阻率值范围在 10～100 Ω·m 之间, 为左右两侧高阻体加持。剖面距 4 100~4 700 m, 在纵向上整体表现为中高—中低—中—高的特点: 地表~标高 0 m 为相对中高阻层, 大部分电阻率在 100 Ω·m 以上, 往北呈现加厚趋势; 表层中阻层~标高 0 m 之间发育大片中低阻体, 向 EN 方向稳定向下延伸, 其电阻率值在 30～100 Ω·m 之间; 最底部逐渐过渡为中高阻层。依据断裂划分标志, 推测了 $TF_{4\text{-}2}$、$TF_{4\text{-}1}$、$TF_{3\text{-}1}$、$TF_{2\text{-}1}$ 断层, 底板滑脱断裂 f_1、f_2。

4.3　热储层富水性

根据 2 条土壤氡气测量和广域电阻率反演断面图, 综合认为: 纵向上正变质岩、岩体为高阻特征, 表现为弱富水性; 石英岩、石英片岩、大理岩等为中低阻, 表现为强富水性; 深部变质基底为高阻, 表现为

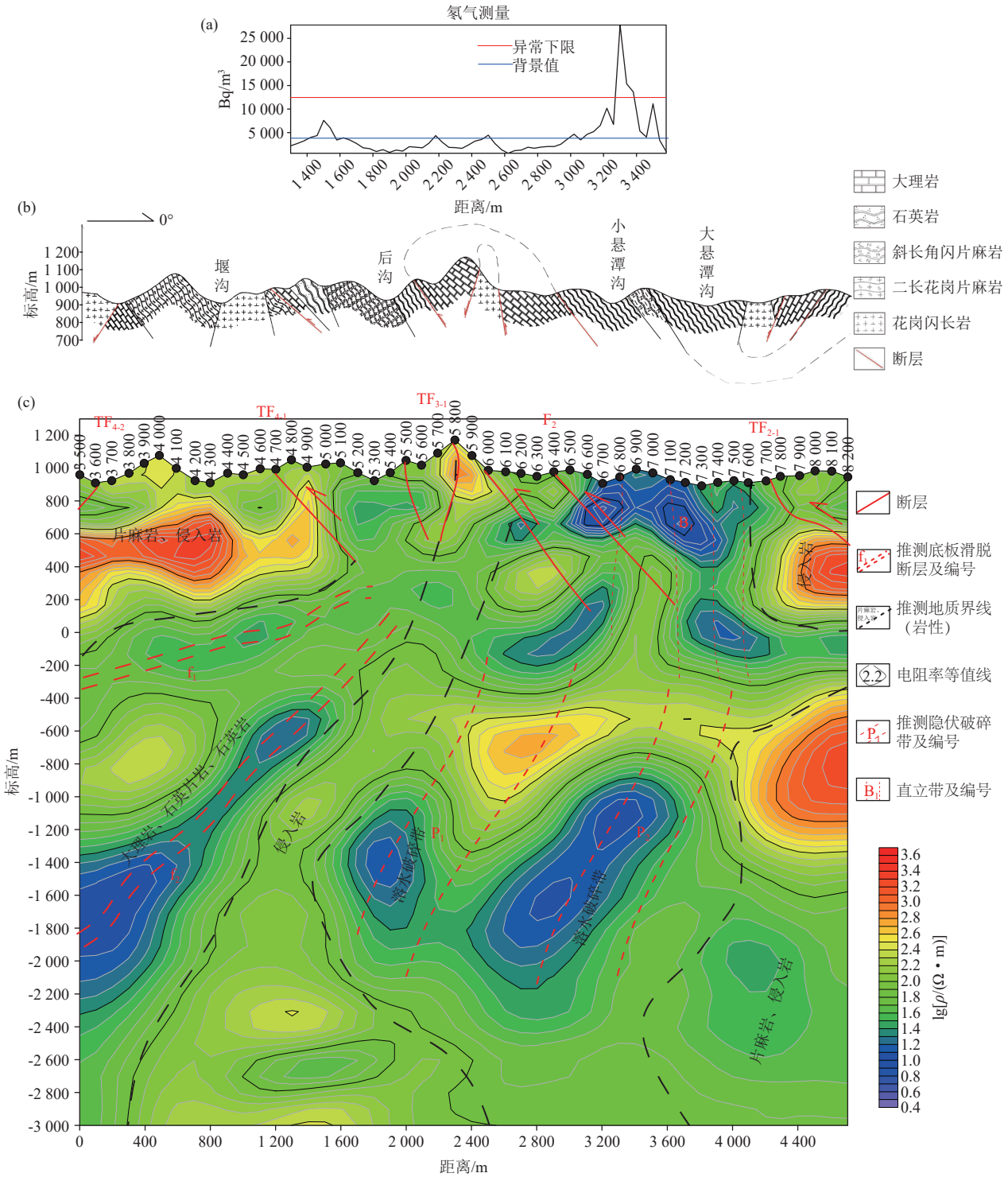


图 7　JC03 剖面综合推断解释

Fig. 7　Comprehensive inference and interpretation of JC03 profile

极弱富水性。横向上，剖面南部中深层电阻率表现为“向形”低阻特征，受 f_1、f_2 底板滑脱断层控制，延伸深度 2 000 m 左右。剖面北部中深层表现为低阻特征，稳定向下延伸，受破碎带控制，延伸深度超过 2 000 m。

综合认为，底板滑脱断层 f_1、f_2 以及深部岩体边部 P_1、P_2 破碎带岩石较破碎，岩性主要为大理岩，富水性较好。

5　钻探验证

根据前期勘探成果，最终于 JC01 剖面 6 000 号点附近布置钻孔一眼，目的是揭露深部隐伏断裂带和副变质岩热储层，以获取地热流体，设计井深

2 000 m。实际完钻井深 2 002 m，由钻探结果 (图 8) 可知：0～500 m，岩性主要为石英岩、大理岩并夹有佛坪岩群片麻岩、闪长岩，整体较破碎，相对低阻层，其中在 250 m 左右出现涌水；500～1 400 m 之间，石英岩、大理岩、片麻岩、闪长岩交替出现，相对完整，整体表现为中阻层；1 400～2 002 m 岩性主要为大理岩、角闪片岩并夹有片麻岩，约在深度 1 400~1 418 m 附近出现明显的泥浆漏失、卡钻现象，断层发育；1 500 m 以下广泛揭露九关沟组角闪片岩，含有硫化物、石墨、黄铁矿化，整体电阻率值较低。

从编录的钻柱状图来看，钻孔内大理岩、石英岩、片麻岩、花岗岩交替重复出现，印证了前期对工作区的地质认识，即多重推覆、构造叠加。总的来看，前期地质认识、推断与钻孔实际地层结构一致性较高。钻探结果很好地验证了综合推断结果。经过抽水试验，静水位 9.6 m、抽水降深在 449.3 m 时稳定出水量 392 m^3/d，井口达水温 35 ℃，硫磺味重，水化学类型为 SO_4^{2-}-Na^+型，矿化度为 436 mg/L，属于淡水，总硬度为 14 mg/L，属于软水，pH 值为 9.1，属于弱碱性水，热水中偏硅酸含量 82 mg/L，达到理疗热矿水价值浓度和命名矿水浓度，具有较高的理疗价值。

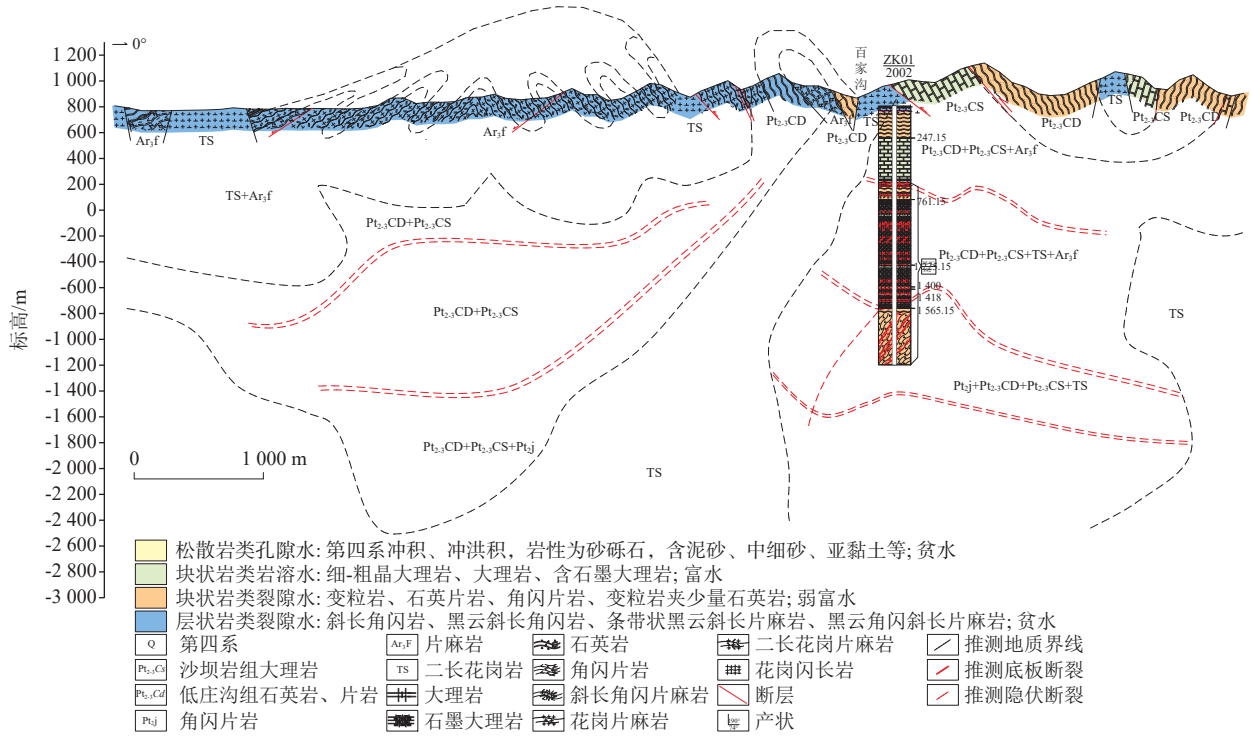


图 8　推测过井地热地质剖面

Fig. 8　Speculative geothermal geological profile of the well

6　地热成因分析

6.1　同位素特征

同位素技术是研究地下水资源属性的重要有效工具，通过测定地热水中的稳定同位素 ^{18}O、^{2}H、^{14}C 研究地热水的成因，年龄以及补给来源[29-31]。

本次研究共分析 H、O 同位素 9 件。一般而言，水循环较深，补给雨水一般来自于较远的地区或者高山，因此 δD 值和 $\delta^{18}O$ 值一般较当地地表水、浅地下水偏负。

从佛坪地区热流体样的 δD—$\delta^{18}O$ 图 (图 9) 上可见，除地热井热水外，其余水点基本落在大气降水线附近，说明其补给均直接或间接来源于当地大气降水的就近入渗补给。而地热水偏离大气降水线较多，说明地下热水不是直接来源于当地大气降水的就近入渗补给，而是大气降水入渗经过较远距离径流后补给形成的。

根据地热水 ^{14}C 测定年龄为 2 102 a，是在全新世期间形成的，表明地热水系统与现代降水或地表水联系密切，含水层接受近期补给的能力较强。根据区域地层、构造及地形地貌分析，推断主要补给区主要来自佛坪北部、西部及东部的中高山区。

6.2　热储模型

热源是形成地热资源的必备要素之一，主要包括深部地幔热流、岩浆岩余热、地层放射性元素衰

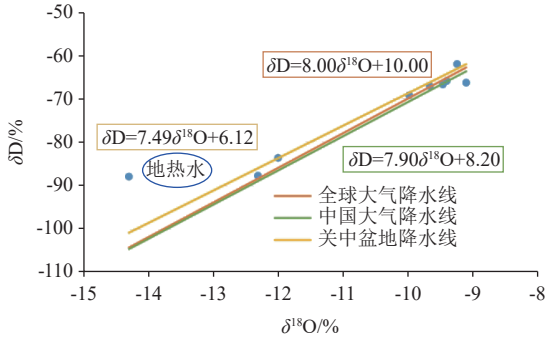


图 9　佛坪地区地表水—地热水 δD—δ^{18}O 图

Fig. 9　δD - δ^{18}O map of surface water and geothermal water in Foping area

变放热、活动断裂及地震产生的机械摩擦热等[32-33]。在秦岭造山带，地下水在长距离运移过程中吸收岩层热量，温度不断升高，形成地热水，热量主要来自地温梯度增温、岩体余热及断裂活动。

研究区位于秦岭造山带最狭窄的位置，周边发育大面积的花岗岩和片麻岩，多数学者称之为古隆起，其热活动从晋宁期一直持续到燕山期。持续的热流体活动导致了该隆起岩浆活动具有多期多成因复合的特点[34]。根据地球物理异常特征、地质条件及钻孔资料，佛坪地区表现为由 NW—SE 方向多重推覆，北段逆冲、南段下滑，总体构造样式为以佛坪县城为中心的背形构造。断裂作为沟通深部热源的通道，为地下水运移、交换和储存提供了必备空间[35]，尤其是在井深 1 400~1 418 m 左右，泥浆温度陡然增高，说明此处断裂具有导热、导水作用。因此，笔者认为，研究区属造山带中低温对流型构造裂隙热储。

盖层是热储层上方、能够阻止热量向外散失的岩层，是地热系统的重要地质结构[36]。就本区而言，保温盖层为第四系(Q)和浅部推覆岩片。其中第四系地层厚度为 7.5 m，主要成分为黄褐色含砾砂质黏土、含泥砂砾层、含漂石砾卵石层、漂石层及亚砂土、亚黏土等。浅部推覆岩片厚度 500~1 200 m，地层岩性主要为石英岩、大理岩及片麻岩。第四系和浅部推覆岩片地层导热性较差，为地热资源形成起到隔热保温作用，它们共同构成了高效的隔热保温盖层。

笔者结合地质、钻探、物探等成果，构建了工作区 4 000 m 深度的地热资源的成因模式(图 10)。

百家沟以北，秦岭北部的高山补给区大气降水沿地表断层(TF_{3-1}、F_2、TF_{2-1}、TF_1)入渗转化成地下水，在长角坝向斜底板断层附近汇聚，并沿破碎带 P_1、P_2 和层间裂隙向深部运移，在深循环过程中，水体不断吸收来自地温梯度、岩体余热及深部热流的热量，温度持续升高。在压力差作用下，热流体在长角坝向斜深部沿构造通道和岩层裂隙上升至浅部，通过断裂构造带与围岩发生水—岩反应，在裂隙带(大理岩、石英岩等脆性岩石)富集、储存。

百家沟以南地区，佛坪背斜核部应力集中，断裂和构造裂隙发育。大气降水沿 TF_{4-1}、TF_{4-2}、TF_{3-2} 向下运移，并在推覆岩片底板断裂 f_1、f_2 附近的大理岩、石英岩等脆性岩石富集，由北向南进行进行深循环过程中，同时地下水不断吸收从地壳深部向上传输的热流，被加温增热的地热流体上涌，构成了区内地热水深循环系统[37]。

整体来看，研究区深部地热资源主要孕育在高

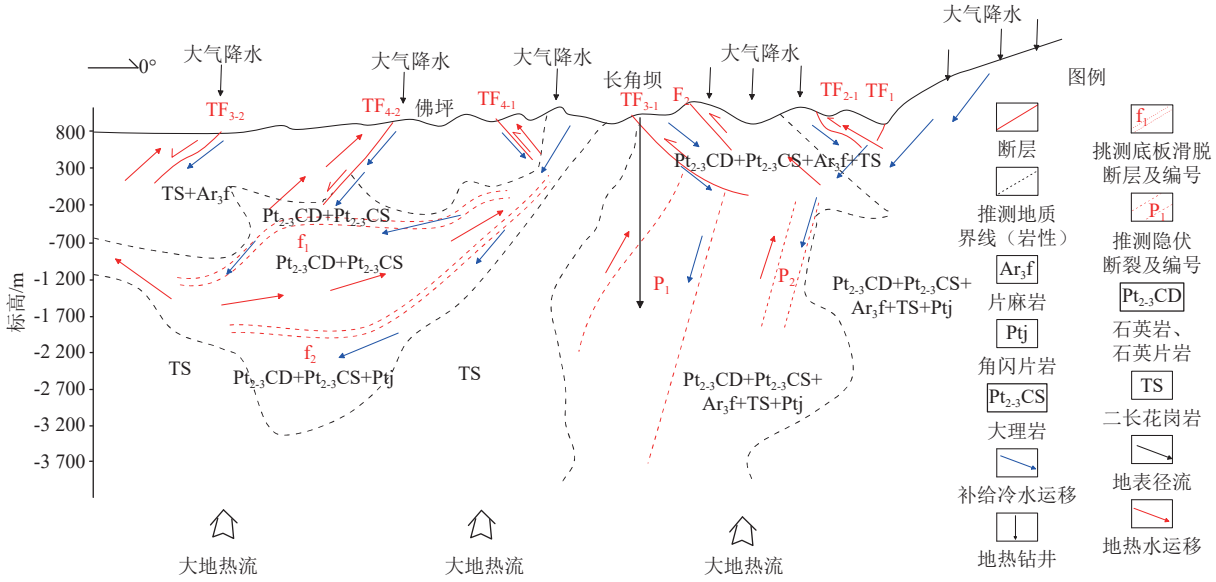


图 10　地下热水成因模式

Fig. 10　Genesis model of groundwater hot water

低阻过渡带内以及推覆岩片的底板断裂附近。因此,对于佛坪地区进一步的地热勘查工作,应重点关注深部的高低阻梯级带以及中高阻之下的带状低阻异常。这些部位多为受后期岩体侵入形成的韧性剪切带或推覆运动过程中形成的破碎带,具有良好的储水空间。

7 结论

1)结合研究区地球物理异常特征、地质条件及钻孔资料,对佛坪穹隆提出了新的认识:整体表现为由NW—SE方向多重推覆,北段逆冲,南段下滑,总体构造样式为以佛坪县城为中心的背形构造。

2)通过2条广域电磁电阻率反演剖面综合对比分析,工作区深部存在连续性分布的低阻带,这与底板滑脱断裂、岩体侵入时中边部形成的断裂破碎带相关。这些断裂为地下水的向下运移和储存创造了条件,推覆岩片叠加过程中,岩片间裂隙较为发育,大理岩、石英岩等脆性岩石形成的孔、洞、裂隙等形成了地热水赋存的空间。

3)广域电磁法较为直观地反映了研究区地下深部地电信息,推断了佛坪地热空白区地下地质体的空间分布以及储热层含水情况,并结合氡气测量确定了断裂构造、电阻率异常中心位置,为地热钻孔布设提供可靠的地球物理依据,具有良好的应用效果。

4)结合当地产业规划、经济发展、道路条件等客观因素,于教场坝部署了地热勘探井井位。完钻井深2 002 m,钻遇地层结构与物探推断结果基本一致,石英岩、大理岩、片麻岩、花岗岩交替出现,符合多重推覆、构造叠加特征。根据测井资料,最终选用取水段584~2 002 m,抽水前静水位9.6 m,大降深449.30 m时稳定出水量392 m^3/d,井口水温达35 ℃,水质良好,打破了佛坪穹隆不含水或含水量少的传统理念,为佛坪地区后期地热资源开发利用指明了方向。

参考文献(References):

[1] 王居里. 秦岭造山带佛坪基底杂岩的地质特征 [J]. 西北地质, 2002, 35(2): 1−8.
Wang J L. Geological features of the Foping basal complex, Qinling orogenic belt[J]. Northwestern Geology, 2002, 35(2): 1−8.

[2] 王居里, 张国伟. 秦岭佛坪穹隆盖层岩系的地质和地球化学特征 [J]. 西北大学学报: 自然科学版, 1999, 29(5): 417−421.
Wang J L, Zhang G W. Geological and geochemical features of the cover rock series of Foping dome, Qinling orogenic belt[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 1999, 29(5): 417−421.

[3] 王居里. 佛坪地区印支期花岗岩的成因 [J]. 西北大学学报: 自然科学版, 1997, 27(6): 521−524.
Wang J L. Genesis of indo-Chinese epoch granites in Foping area[J]. Journal of Northwest University: Natural Science Edition, 1997, 27(6): 521−524.

[4] 王居里. 秦岭造山带佛坪地区花岗岩类的特征及其意义 [J]. 西北大学学报: 自然科学版, 1995, 25(5): 497−502.
Wang J L. Characteristics and significance of granite in Foping area of Qinling Orogenic Belt[J]. Journal of Northwest University: Natural Science, 1995, 25(5): 497−502.

[5] 查显锋, 董云鹏, 李玮, 等. 南秦岭佛坪隆起的成因探讨——构造解析的证据 [J]. 大地构造与成矿学, 2010, 34(3): 331−339.
Zha X F, Dong Y P, Li W, et al. Uplifting process of Foping dome in southern Qinling: Constrained by structural analysis[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2010, 34(3): 331−339.

[6] 查显锋. 南秦岭佛坪隆起的构造过程及成因机制 [D]. 西安: 西北大学, 2010.
Zha X F. Discussion on the genesis of Foping dome in southern Qinling: Evidence from structural analysis[D]. Xi'an: Northwest University, 2010.

[7] 翟刚毅. 东秦岭佛坪穹隆变质作用与构造动力学分析 [J]. 矿物岩石, 2000, 20(2): 86−90.
Zhai G Y. Analysis of metamorphism and tectonic dynamics of domes in Foping county of east Qinling[J]. Mineralogy and Petrology, 2000, 20(2): 86−90.

[8] 王根宝, 李三忠. 论秦岭佛坪地区隆-滑构造 [J]. 长春科技大学学报, 1998(1): 23−29.
Wang G B, Li S Z. Preliminary discussion on uplift bedding delamination structures in Foping area, Qinling[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 1998(1): 23−29.

[9] 王根宝. 南秦岭佛坪片麻岩系同位素年代学及其地质意义 [J]. 西北地质科学, 1997(2): 21−25.
Wang G B. Isotope chronology and its significances of Foping gniess system, south Qinling[J]. Northwest Geoscience, 1997(2): 21−25.

[10] 王根宝. 佛坪穹隆有新说 [J]. 陕西地质, 1997, 15(2): 93.
Wang G B. A new theory of Foping dome[J]. Geology of Shaanxi, 1997, 15(2): 93.

[11] 李清林, 王夫运, 黄邦武, 等. 洛阳、新绛、夏县地热田的重磁异常特征 [J]. 物探与化探, 1991, 15(2): 129−133.
Li Q L, Wang F Y, Huang B W, et al. Characteristics of gravity and magnetic ano-malies op geothermal fields in Luoyang, Xinjiang and Xiaxiang[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 1991, 15(2): 129−133.

[12] 许力. 石泉县地热资源潜力分析 [D]. 西安: 长安大学, 2021.
Xu L. Potential analysis of geothermal resources in Shiquan county[D]. Xi'an: Changan University, 2021.

[13] 孙晓东. 综合地球物理方法在伊通盆地乐山段地热勘查中的应用 [D]. 长春: 吉林大学, 2018.
Sun X D. Application of comprehensive geophysical method in geothermal exploration in Leshan section of Yitong basin[D]. Changchun: Jilin University, 2018.

[14] 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.
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.

[15] 汪名鹏. 音频大地电磁测深法在深部地热构造勘查中的应用 [J]. 西北地质, 2024, 57(4): 240−251.
Wang M P. Application of audio magnetotelluric sounding in deep geothermal structure exploration[J]. Northwestern Geology, 2024, 57(4): 240−251.

[16] 何继善. 广域电磁测深法研究 [J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(3): 1065−1072.
He J S. Wide field electromagnetic sounding methods[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2010, 41(3): 1065−1072.

[17] 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-area electromagnetic method and pseudo-random signal electrical method[M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.

[18] 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.
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.

[19] 陈龙耀, 刘志慧, 刘晓春, 等. 南秦岭佛坪片麻岩穹隆变质作用及与岩浆作用的关系 [J]. 地球科学, 2019, 44(12): 4178−4185.
Chen L Y, Liu Z H, Liu X C, et al. Metamorphism and its relation of magmatism of the Foping gneiss dome in the south Qinling tectonic belt[J]. Earth Science, 2019, 44(12): 4178−4185.

[20] 常宏, 王向利, 能伟. 南秦岭佛坪穹隆基底组成 [J]. 西北地质, 1998, 31(3): 6−11.
Chang H, Wang X L, Neng W. Composition of Foping vault basement in south Qinling[J]. Northwestern Geology, 1998, 31(3): 6−11.

[21] 罗浩, 刘子维, 郭清海. 土壤氡定量测试方法优化及其在中低温对流型地热系统识别中的应用 [J]. 地球科学, 2025, 50(4): 1559−1574.
Luo H, Liu Z W, Guo Q H. Optimization of soil radon quantitative testing methods and its application in identification of medium-low temperature convective geothermal systems[J]. Earth Science, 2025, 50(4): 1559−1574.

[22] 吴儒杰, 孙国强, 万汉平, 等. 土壤氡气测量技术在西藏谷露地热田资源勘查中的应用 [J]. 世界核地质科学, 2022, 39(1): 89−96.
Wu R J, Sun G Q, Wan H P, et al. The application of soil radon measurement technology in the exploration of geothermal resources in gulu, Tibet[J]. World Nuclear Geoscience, 2022, 39(1): 89−96.

[23] 苗青壮, 王贵玲, 邢林啸, 等. 综合物化探方法在冀中坳陷深部热储探测中的应用 [J]. 地质学报, 2020, 94(7): 2147−2156.
Miao Q Z, Wang G L, Xing L X, et al. Study on application of deep thermal reservoir by using geophysical and geochemical methods in the Jizhong depression zone[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 2147−2156.

[24] 何继善. 广域电磁法理论及应用研究的新进展 [J]. 物探与化探, 2020, 44(5): 985−990.
He J S. New research progress in theory and application of wide field electromagnetic method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(5): 985−990.

[25] 张贤, 李帝铨, 胡艳芳, 等. 基于 IITD 和 PNN 的广域电磁法数据信噪分离方法 [J]. 地球物理学进展, 2024, 39(1): 241−252.
Zhang X, Li D Q, Hu Y F, et al. WFEM signal-noise separation method based on improved inherent time-scale decomposition and probabilistic neural network[J]. Progress in Geophysics, 2024, 39(1): 241−252.

[26] 吴桐, 李帝铨, 索光运, 等. 广义 S 变换时频分析在广域电磁法数据处理中的应用 [J]. 物探化探计算技术, 2019, 41(3): 379−385.
Wu T, Li D Q, Suo G Y, et al. The application of the generalized S-transform in the data processing of the wide-field electromagnetic method[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 41(3): 379−385.

[27] 朱裕振. 广域电磁法静态效应校正方法研究与应用 [D]. 长沙: 中南大学, 2011.
Zhu Y Z. Wide field electromagnetic method static correction research and application[D]. Changsha: Central South University, 2011.

[28] 陆柏树. E-Ex 广域电磁法静态校正方法探讨 [J]. 资源环境与工程, 2018, 32(1): 137−141.
Lu B S. Discussion of static correction methods for E-Ex wide field electromagnetic method[J]. Resources Environment & Engineering, 2018, 32(1): 137−141.

[29] 常海宾, 肖江, 皮景. 湖南省地热水氢氧同位素特征分析 [J]. 水资源开发与管理, 2021, 7(4): 25−31.
Chang H B, Xiao J, Pi J. Analysis of hydrogen and oxygen isotope characteristics of geothermal water in Hunan Province[J]. Water Resources Development and Management, 2021, 7(4): 25−31.

[30] 袁晓芳, 邓娅敏, 杜尧, 等. 江汉平原高砷地下水稳定碳同位素特征及其指示意义 [J]. 地质科技通报, 2020, 39(5): 156−163.
Yuan X F, Deng Y M, Du Y, et al. Characteristics of stable carbon isotopes and its implications on arsenic enrichment in shallow groundwater of the Jianghan Plain[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(5): 156−163.

[31] 张雪莲. 秦岭山前地下热水同位素水文地球化学特征 [D]. 西安: 长安大学, 2016.
Zhang X L. Isotopic hydrogeochemical characteristics of underground hot water in front of Qinling Mountain[D]. Xi'an: Changan University, 2016.

[32] 章旭, 张文, 吕国森, 等. 川西阿坝州壤古温泉成因机制研究: 来自水文地球化学和地球物理勘探的证据 [J]. 沉积与特提斯地质, 2023, 43(2): 388−403.
Zhang X, Zhang W, Lyu G S, et al. Geochemical, geophysical genesis of the ranggu geothermal spring in Aba prefecture, western Sichuan: Evidence from hydrogeochemical and geophysical exploration[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2023, 43(2): 388−403.

[33] 卢星辰, 邢倩, 许勇, 等. 基于大地电磁的南宫地热田地热资源赋存特征 [J]. 物探与化探, 2025, 49(3): 559−568.
Lu X C, Xing Q, Xu Y, et al. Exploring the occurrence characteris-

tics of geothermal resources in the Nangong geothermal field based on the magnetotelluric method[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(3): 559−568.

[34] 朱华平, 张蓉, 郭健, 等. 秦岭佛坪古陆及周边热事件、盆地与成矿 [J]. 矿产勘查, 1999(1): 16−20.
Zhu H P, Zhang R, Guo J, et al. Thermal event, basin and metallogenesis of the Fuping ancient land, Qinling[J]. Mineral Exploration, 1999(1): 16−20.

[35] 李冬怀, 程纪星, 万汉平, 等. 西藏续迈地热田 “热水河” 深部热源通道及其成因 [J]. 世界地质, 2022, 41(2): 334−341.
Li D H, Cheng J X, Wan H P, et al. Deep heat source channel of “hot river” in Xumai geothermal field, Tibet and its genetic mechanism[J]. Global Geology, 2022, 41(2): 334−341.

[36] 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 G L, Lin W J. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 1923−1937.

[37] 涂明江, 赵良杰, 李强, 等. 黔西南地区地热储层结构特征——以望谟平洞地热储层为例 [J]. 中国岩溶, 2024, 43(1): 84−91.
Tu M J, Zhao L J, Li Q, et al. Structural characteristics of geothermal reservoirs in southwest Guizhou: Taking Pingdong geothermal reservoir in Wangmo County as an example[J]. Carsologica Sinica, 2024, 43(1): 84−91.

Application of comprehensive geophysical exploration technology in geothermal exploration of the Foping dome

XU Kun, WANG Chen, ZHENG Xiang-Guang

(*Shaanxi Geology and Mining Second Comprehensive Geophysical Prospecting Brigade Co., Ltd., Xi'an* 710016, *China*)

Abstract: The Foping area, a geological dome in southern Shaanxi Province, has long been a geothermal blank zone. To explore the deep structural characteristics and stratigraphic configurations of the dome and preliminarily delineate the accumulation range of geothermal water, this study arranged the wide-field electromagnetic method (WFEM) and soil radon measurement profiles in the Foping area. Through field data collection, processing, and inversion, the electrical structural characteristics of the Foping area within a burial depth of 4 000 m were obtained. A new understanding was proposed accordingly: the Foping area develops multiple nappes from northwest to southeast, with the northern and southern sections dominated by thrusting and gliding, respectively. Its overall structural style is manifested as an antiform centered around Foping County. A continuous low-resistivity anomaly zone, occurring in the deep part, is associated with the roof detachment fault and the fracture zones formed in the central and lateral parts during rock intrusion. These faults create conditions for the downward migration and storage of groundwater. The superposition of thrusting rock fragments has led to well-developed fractures between rock fragments and pores, vugs, and fractures in brittle rocks such as marbles and quartzites, constituting the space for the occurrence of geothermal water. Based on objective factors such as local industrial planning, economic development, and road conditions, drilling work was conducted in Jiaochangba Village, Changjiaoba Town, 2.5 km north of Foping County, along the west bank of the Jiaoxi River. The completed well reached a depth of 2 002 m, producing geothermal water with a temperature of 35 ℃ at a flow rate of 392 m^3/d. This achievement breaks through the traditional concept that the Foping dome contains no or little water. Therefore, this study provides actual data for exploring the geological structural characteristics and hydrogeological conditions in the Foping area, as well as a reliable basis for basic geological theory research.

Key words: Foping; deep structure; wide area electromagnetic method(WFEM); geothermal heat; multiple nappes

（本文编辑：叶佩）