

# 大地电磁法在银川盆地北部电性结构探测中的应用

赵福元<sup>1</sup>,周磊<sup>2\*</sup>,佺阳<sup>1</sup>,虎新军<sup>1</sup>,卜进兵<sup>1</sup>,郭少鹏<sup>1</sup>

(1. 宁夏地球物理地球化学调查院,宁夏银川 750004;  
2. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室,湖北武汉 430100)

**摘要:** 为了研究银川盆地北部控制边界的西部贺兰山东麓断裂和东部黄河断裂,以及盆地内部隐伏的芦花台断裂和银川断裂的深部延伸特性,结合以往的研究手段和尺度,采用大地电磁方法对盆地北部电性结构进行精细探测。通过长周期大地电磁剖面测量,运用近参考处理技术和阻抗张量分解技术,获取了银川盆地北部中深部电性结构信息。随后,利用二维非线性共轭梯度方法对采集数据进行反演,其结果显示银川盆地北部电性分区特征明显,主要断裂反映清晰,且发现深部存在一高导通道,其极有可能为深部幔源物质的上涌通道。此次研究表明,大地电磁测深方法在银川盆地北部是一种重要的探测隐伏断层、地震区孕震环境以及与地热成因有关的地质结构的地球物理测深方法。

**关键词:** 银川盆地;大地电磁;电性结构;高导通道

中图分类号:P631

文献标识码:A

## Application of the Magnetotelluric Method in Detection of Electrical Structures in Northern Yinchuan Basin

ZHAO Fuyuan<sup>1</sup>, ZHOU Lei<sup>2\*</sup>, WU Yang<sup>1</sup>, HU Xinjun<sup>1</sup>, BU Jinbing<sup>1</sup>, GUO Shaopeng<sup>1</sup>

(1. Ningxia Institute of Geophysics and Geochemistry Investigation, Yinchuan, Ningxia 750004, China;  
2. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China)

**Abstract:** In order to study the deep extension characteristics of the western Helan Mountain eastern foothills fault and the eastern Yellow River fault that control the northern boundary of the Yinchuan Basin, as well as the hidden Luhutai fault and Yinchuan fault within the basin, Considering previous research methods and scales, the magnetotellurics method was employed to conduct a detailed exploration of the electrical structure in the northern part of the basin. The article obtained the electrical structure information of the middle and deep parts of the northern Yinchuan Basin through long-period magnetotelluric profile measurements for using near-reference processing techniques and impedance tensor decomposition techniques; The 2D NLGG inversion results show obvious electrical zoning characteristics in the northern part of the Yinchuan Basin. The main fault reflects clearly, and a high conductivity channel has been found in the deep part, which is highly likely to be the upwelling of mantle derived material from the deep part. This study indicates that the magnetotelluric sounding method is an important geophysical sounding method for detecting hidden faults, seismic environments in earthquake prone areas, and geological structures related to geothermal genesis in northern part of the Yinchuan Basin.

**Key words:** Yinchuan Basin; Magnetotelluric; electrical structure; high conductivity channel

收稿日期:2024-05-16

基金项目:宁夏自然科学基金资助项目(2022AAC03653);自治区地质局2022年度财政项目(NXCZ20220206)

第一作者:赵福元(1986—),男,宁夏银川人,硕士,高级工程师,主要从事地球物理勘查工作。

\* 通信作者:周磊(1985—),男,山东烟台人,博士,副教授,主要从事电磁勘探新方法、新技术研究工作。

银川盆地是鄂尔多斯周缘新生代断陷盆地的一部分,夹持于阿拉善地块与鄂尔多斯地块之间,且向南与祁连山褶皱带相接。自新生代以来,该盆地发生强烈断陷,沉积了巨厚新生代地层<sup>[1-2]</sup>。盆地总体呈北北东走向,但在甘沟至横城一线以南转为北北西走向,使得盆地略显向西凸出的弧形。大致以该线为分界线,盆地可分为南北两部分:北部称为“银北凹陷”,南部称为“灵武凹陷”<sup>[3]</sup>。陈晓晶等<sup>[4]</sup>利用1:20万剩余重力异常资料,以银参三井为约束进行了2.5D人机交互反演,认为银川盆地北部地层呈“两侧抬升、中部下沉、西深东浅、层系缺失”的特征。

盆地的主要断裂包括西部边界贺兰山东麓断裂和东部边界黄河断裂,以及盆地内部隐伏了芦花台断裂和银川断裂。受这些断裂控制,银川盆地北段基底(新生界)向西倾斜,厚度由东逐渐加大呈梯状剖面结构。在平面研究方面,李宁生等<sup>[5]</sup>利用边界识别技术基本刻画出了银川盆地及北部深部构造的展布特征,显示银川盆地北部平罗至惠农段断裂构造走向发生了一定的偏转,即由北东向转为近南北向,且有多条断裂发生交汇,该区域重力剩余异常显示为低值。在剖面研究方面,宁夏地质调查院尹秉喜等<sup>[6]</sup>完成了横穿贺兰山褶断带与银川断陷盆地的大地电磁(Magnetotellurics, MT)测量工作(编号E-E'),获得了15 km深度范围内二维反演电性结构剖面,基本查明了控制银川断陷盆地的主要断裂。该剖面位置在盆地北端穿过陶乐和姚伏镇中间,但平罗县往北区域的断裂深部展布情况和部分隐伏构造未知。中国地震局地质研究所相关学者做了银川盆地三维深部电性结构特征及其地球动力学意义研究,表明银川盆地下方存在异常的地幔活动<sup>[7]</sup>。朱怀亮等<sup>[8-9]</sup>基于大地电磁测深和钻探探测,对银川盆地东缘的地热资源勘探远景进行了评价。曹学刚等<sup>[10]</sup>以银川平原东侧、鄂尔多斯盆地西缘为研究对象,证明了大地电磁测深法在银川平原黄河东岸地热资源调查评价中的适用性。上述研究对银川盆地内部断裂构造的空间分布特征、活动性等进行了相关研究,但对盆地北部的研究程度还有所欠缺,导致上述主要断裂构造在北部的延伸情况未知。本次研究主要是对盆地北部20 km以浅的电性结构进行刻画,以补充以往研究中的不足。

## 1 研究区简介

本次研究区位于宁夏银川盆地内部。该区域

地层属柴达木-华北地层大区、华北地层区、鄂尔多斯西缘地层分区、桌子山-青龙山地层小区,盆地的基底为寒武-奥陶系,盆地内沉积了巨厚的新生代地层,该地层覆盖面积达盆地总面积的90%以上。盆地内部构造复杂、活动断裂发育,主要的断裂构造为贺兰山东麓断裂、银川断裂、芦花台断裂、黄河断裂,很多学者研究发现这些断裂与地震的发震构造联系密切<sup>[11]</sup>,也与地热关系密切<sup>[12-14]</sup>,这些断裂在以往工作剖面上有所显示,但在银川盆地北部的情况未知,因此需在北部补充MT剖面。

研究区上覆地层基本为新生界地层,本研究给出了布设的实测大地电磁剖面位置(底图为剩余重力异常,蓝色为低值,红色为高值),编号为P2,剖面方位角115°,起始点编号为100。从图1中可以看出,银川盆地内均为剩余重力负异常,其中北部的宝丰局部负异常变化梯度最大,重力推断的多条断裂在此处“汇聚”或“消失”。因此,大地电磁剖面P2经过该区域且横跨重力正负异常区,以此与平面重力推断的结果相互印证。表1为收集的宁夏北部及邻近区电性结构数据。

从表1中可以看出:地壳上地幔分为若干层,整体上,各区块浅部电阻率变化在几欧姆·米到几十欧姆·米不等,在“阿拉善微陆块”电阻率较高。在中深部,“银川地堑”区块有一低阻带,电阻率不超过20  $\Omega \cdot m$ ,到“鄂尔多斯地块”低阻带深度更大。总体上,“鄂尔多斯地块”和“阿拉善微陆块”的电性层在横向上变化平缓,成层性和整体性好。这表明这两个地块较为完整,相对稳定,在很长的地质历史时期内较少遭受形变破裂。而构造活动剧烈的“银川地堑”,电性结构复杂,电性界面起伏大,并且壳内有几个低阻层分布。这种电阻率的交替变化反映出了剧烈的构造作用和深部物质运动。

## 2 大地电磁数据采集和处理分析

本次大地电磁野外资料采集使用的设备为加拿大凤凰公司V8工作站(磁探头型号为MTC-80H),工作时投入使用2套设备进行观测,以便进行“近参考”处理,同步方式采用GPS时钟同步。大地电磁采集所经剖面部分测点附近有乡镇、村庄等,公路和高压线较多,人文干扰较大。正式采集前对剖面的点位进行实地踏勘,对个别点位进行适当偏移,尽可能地减少不确定干扰因素。

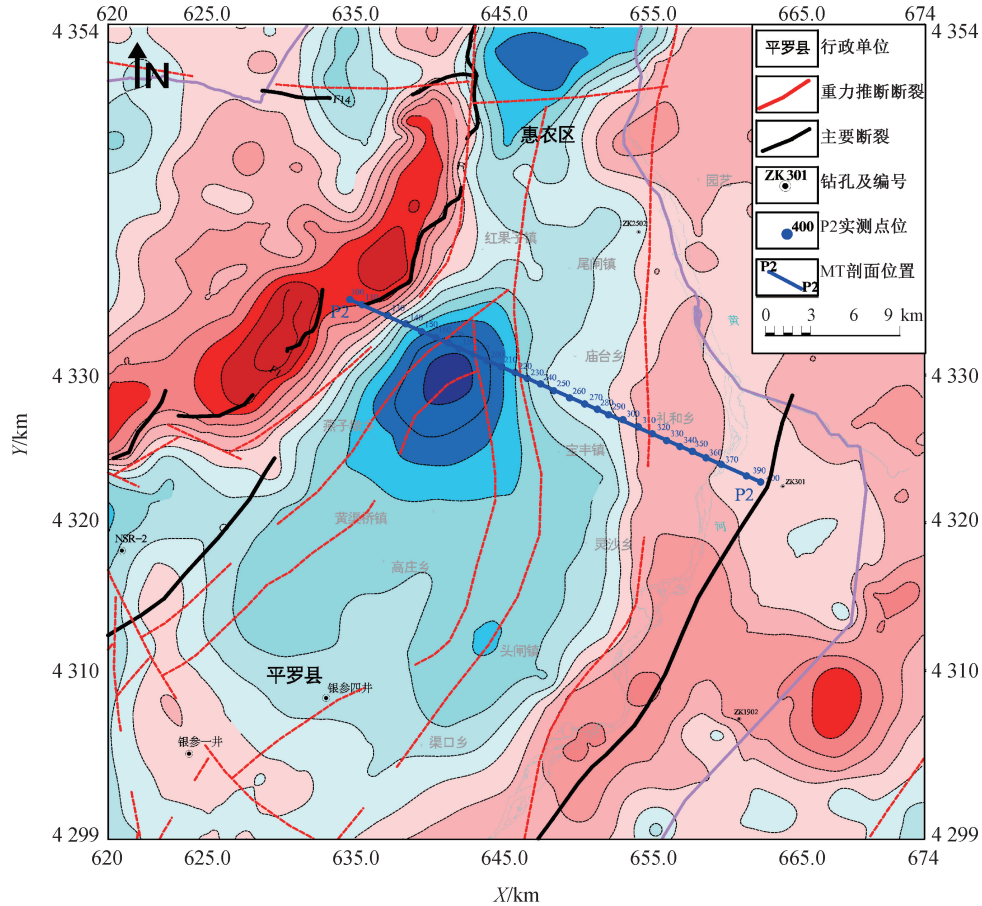


图 1 剖面位置图

Fig. 1 The section location

表 1 宁夏北部及相邻地区壳幔电性结构

Tab. 1 Electrical structure of crust and mantle in northern Ningxia and adjacent areas

层序	银川地堑			鄂尔多斯地块			阿拉善微陆块		
	电阻率 /( $\Omega \cdot m$ )	厚度 /km	底面深 /km	电阻率 /( $\Omega \cdot m$ )	厚度 /km	底面深 /km	电阻率 /( $\Omega \cdot m$ )	厚度 /km	底面深 /km
1	5.0~50.0	2~5	2.4~5.0	50	1~2	1~2	100	1~2	1~2
2	600.0~1 000.0	16~19	19.0~22.0	30	5~8	6~10	50	12~15	14~18
3	1.0~20.0	6~8	25.0~27.0	1 000	20~25	30~32	400	12~15	29~30
4	1 000.0~5 000	60	85.0~89.0	10~12	7~8	36~39	10~70	7~9	37~38
5	0.2~12.0	—	—	100.0~10 000	87~92	123~131	5 000	75	112
6	—	—	—	10	—	—	8~17	—	—

进场前对仪器主机和感应磁棒均进行了标定及一致性实验,在满足要求后开展采集工作。采集方式为“十字形”5分量采集,即每个点观测  $E_x$ 、 $E_y$ 、 $H_x$ 、 $H_y$ 、 $H_z$  这 5 个分量,分别测量其计算得到  $xy$  和  $yx$  两个方向的卡尼亚视电阻率。测量电极距为 100 m,测量点距为 1 km,测量频率范围为 0.000 34~320 Hz,实际测量点数为 29 个,由于厂房区域和地形原因,丢弃 2 个测点(即 120、410 测点);部分地段根据实际有所调整,因调整后部分点距大于 1 km,因此整体剖面长度约 31 km。

### 2.1 数据采集和前期处理

在正式采集前,开展了采集时长实验工作。为保证效率和数据质量,并结合目标深度,各采集点采集时长均在 8 h 以上,采集点位经过前期严格踏勘筛选,期间应用了近参考技术<sup>[12]</sup>,获得了质量较好的数据资料,其数据曲线较为光滑,误差棒较小,信噪比高。

图 2 为黄河断裂附近测点的实测视电阻率和阻抗相位曲线图,测点编号分别为 370、380、390、400。从图中可以看出,单测点初步反映了银川盆地

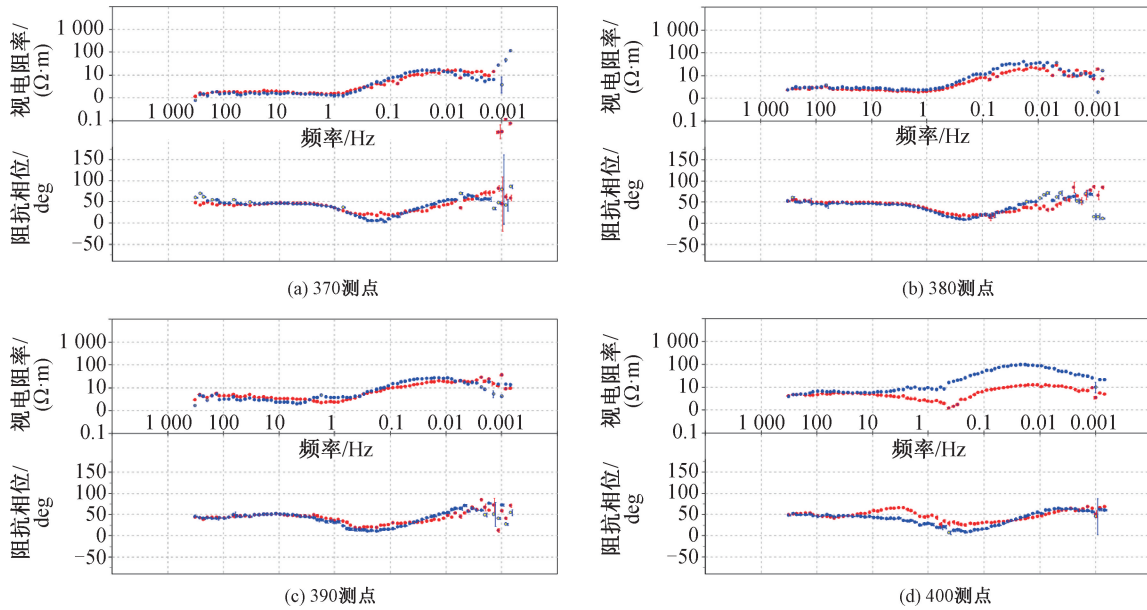


图2 实测视电阻率和阻抗相位曲线

Fig. 2 Actual measured apparent resistivity and impedance phase curve

北部的电性结构差异,高低阻变化明显。视电阻率曲线在 TE 和 TM 模式下表现出较好的一致性,表明该地区地层具有良好的层状特性。

## 2.2 近参考处理

大地电磁法中,噪声和有用信号的划分是相对的。一般情况下,将不满足平面波条件的信号视为噪声。由于研究区人文随机干扰较多,本次观测采用 2 套设备同时工作。其中一套设备布设在距离干扰源相对较远的区域,使参考点和观测点不处于同一区域性电磁干扰源的影响范围内。数据处理时,参考受干扰影响较小的测点数据<sup>[15]</sup>。在观测时参考点与测点的仪器型号相同、布极方式一致,并且进行同步观测,均记录了相应的时间

序列。下面为在一特定无法避开的干扰区(附近工厂)应用近参考处理前后的实测数据对比。

图 3(a)为利用自身电道和磁道计算结果,图 3(b)经过近参考道(本次应用主要是参考磁道)处理后的结果。通过对比发现数据质量在中低频段有明显改善,“死频带”数据质量也有较明显改善,中高频部分则更加平滑,数据质量明显优于自身磁道处理结果。实际工作中,多台仪器同时工作时,若某点刚好处于干扰区,则可以选择干扰相对较小的某点,利用近参考方式提高数据的质量,消除干扰引起的数据跳跃,使得曲线更加连续。这在实际工作中是一种非常有效且可行的方法。当干扰更加严重时若要取得更加理想的效

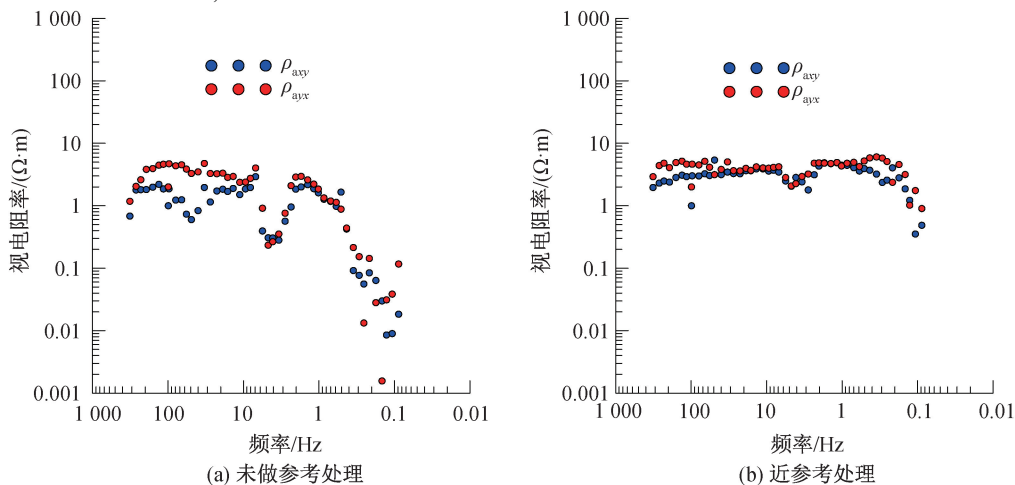


图3 近参考处理前后结果对比

Fig. 3 Comparison of results before and after close reference

果,除了增加观测时间外,需要选择在远离干扰区的地方布设远参考站。该方法可有效压制随机干扰,提高数据信噪比。但由于施工成本和仪器限制,本次未布设远参考站。

### 3 大地电磁反演与解释

如前文所述,大地电磁法数据易受场源噪声、地质噪声和人文噪声干扰。为提高数据的准确性、可靠性,得到比较好的结果,除了采用互参考处理方式压制噪声以外,还要对野外原始数据进行预处理,然后进行阻抗张量分解处理,然后进行阻抗张量分解处理。本文主要采用非 Robust 法估计谱数据。在预处理过程中,由于大地电磁相邻频点数据通常具有一定的相关性,因此当相邻频点出现突变点时,则按照干扰来处理。具体预处理步骤包括:将时间序列转换为频率相关序列,在 MTEditor 软件中完成挑谱和剔除飞点工作,最后将编辑后的 Crosspower 叠加数据转换成后续反演解释软件可识别的工业标准 EDI 格式。

上述预处理工作完成后,首先进行一维初始反演,以生成初始反演模型,随后进行二维反演,反演采用陈小斌 MTP-6.02 版本软件完成。主要反演参数如下:考虑到背景电阻率和最低有效频率,反演深度在 20 km 内,反演剖面长度为 31 km,共计 29 个反演测点。初始模型采用均匀半空间,其电阻率为  $50 \Omega \cdot m$ 。由于前期大致了解构造的走向,剖面布设基本垂直构造,因此反演时采用了更能清晰反映构造的 TM 模式,迭代次数 52 次,正则化因子 30,反演方法采用二维非线性共轭梯度法,反演曲线拟合较好,如图 4 所

示为 400 点的拟合结果。从图 5 可以看出,反演在第 24 次迭代后,进入稳定收敛阶段,收敛速度较快,表明反演参数选择合理。最终反演均方根误差为 3.36,迭代收敛过程稳定。从图 6 可以看出,实测与反演结果形态及位置基本吻合,说明观测数据与反演理论响应之间具有很好的一致性,数据的拟合程度很高,表明反演结果完全体现了观测数据的约束。最终反演结果如图 7 所示(电阻率数值为以 10 为底的对数)。

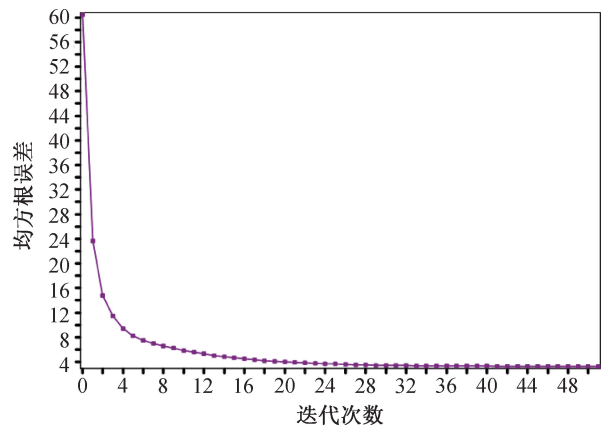


图 5 反演迭代收敛曲线

Fig. 5 Inversion of iterative convergence curve

从图 7 可以看出,本次大地电磁结果对地层的划分比较清晰,整条剖面显示高低阻变化明显,主要断裂位置均能得到反映。在浅部,主要为低阻覆盖层,且覆盖层在银川盆地中央位置处最厚,其电阻率值约为  $10 \Omega \cdot m$ 。银川盆地中部有一低阻带向下延伸较大,赵凌强等<sup>[7]</sup>通过编号为 YCL4 等几条剖面研究发现该低阻体可一直延伸至莫霍

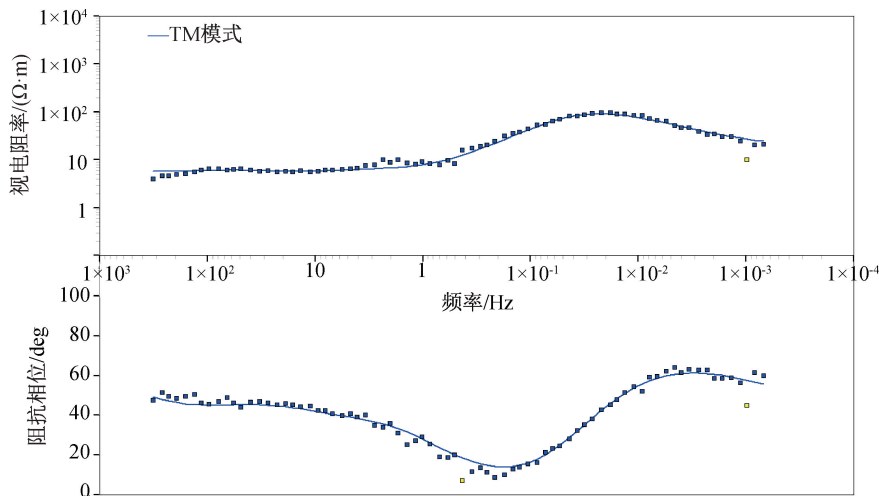


图 4 反演曲线拟合

Fig. 4 Inversion curve fitting

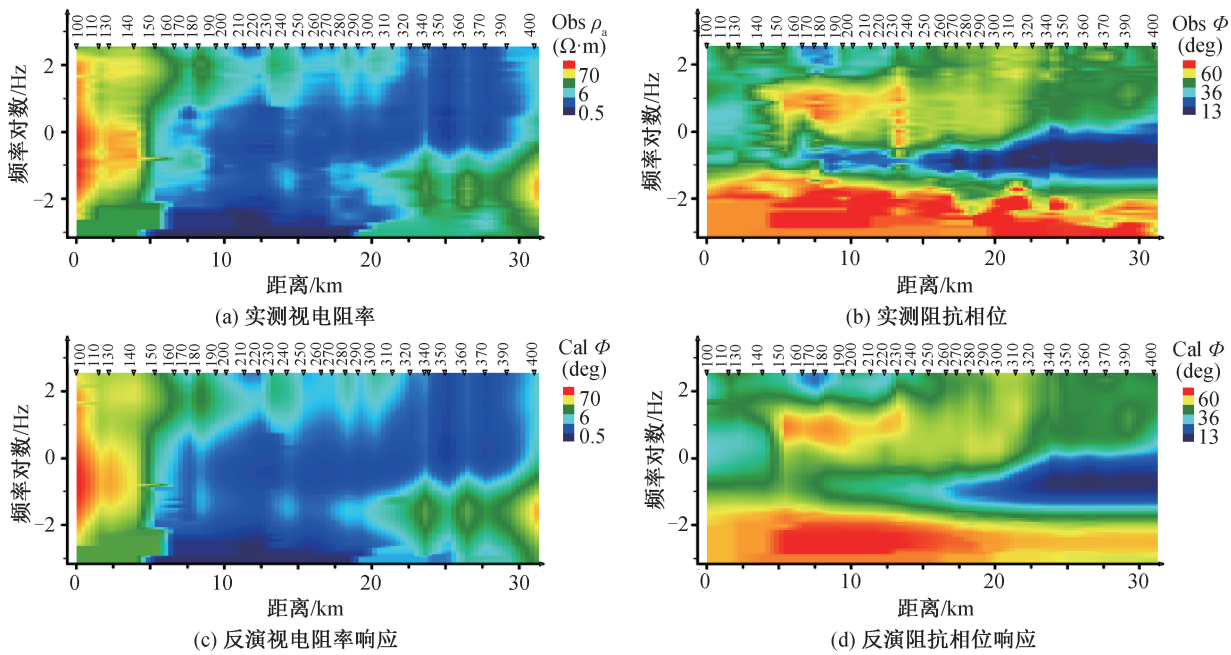


图6 实测与反演结果对比

Fig. 6 Comparison of actual measurement and inversion results

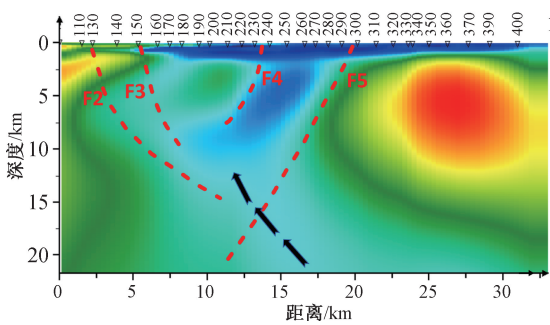


图7 二维反演结果

Fig. 7 Results of 2D inversion

面,与本次 P2 剖面电性结构相似,YCL4 剖面较长且深度较大,横跨贺兰山和银川盆地,包含有阿拉善和鄂尔多斯地块电性信息,该剖面位于本次 P2 剖面南端。关于深部低阻体,胡祥云等<sup>[16]</sup>在研究岩石圈电性结构时认为,幔源物质上涌可形成边界石墨膜或硫化物,从而导致电阻率降低。银川盆地下方延伸的这一低阻体很可能导致幔源物质的上涌,其也可能为黄河断裂导热的根本热量来源。

P2 剖面西端为贺兰山,表现为整体的高阻特征,且高阻体向下延伸较深。剖面西侧属阿拉善地块。结合图 1 所示平面上重力推断的断裂位置,以及在地表实地踏勘的结果,推断出了下列断裂的基本位置。编号 F2 为贺兰山东麓断裂,大致在 130 点附近,倾向向东、向下延伸;编号 F3 为芦花台断裂,大致在 150 点附近,倾向向东、向下延伸较

小;编号 F4 为银川断裂,大致在 230 点附近,剖面上显示倾向向西,银川断裂与芦花台断裂同为银川盆地内部断裂;编号 F5 为黄河断裂,大致在 300 点附近,倾向向西、向下延伸较大,该断裂为鄂尔多斯地块和银川盆地的分界断裂;黄河断裂以东为一巨厚高阻体,属鄂尔多斯地块。近年来在盆地东缘发现了天山海世界地热田,其与黄河断裂的关系密切,深部热量来源与本次研究发现的深部高导体关系密不可分,可以作为下一步的研究方向。本次大地电磁反演剖面推断的断裂 F2 与 F3 处个别点数据人文干扰大,存在一定的误差,而 F4 与 F5 和平面上重力推断结果吻合度高,仅投影位置稍有差异。

整体上,银川盆地位于东西两侧相对较稳定的阿拉善和鄂尔多斯地块之间,为典型的山脉高阻体和盆地低阻体的盆山构造特征,且深部存在着呈低阻特性的幔源物质的上涌。这种两端稳定,中间构造比较发育的特征,加上深部低阻物质上涌,破坏了岩石圈及上地壳的稳定性。幔源低阻体与上覆的相对高阻带之间的接触边界带,是易于发生地震的构造部位,1739 年的平罗大地震正好位于该接触边界带。此外赵红格等<sup>[17]</sup>研究发现,银川盆地开始进入快速断陷扩张期,这势必会导致盆地内部的断裂活动强度显著增大,从而增加了该地区的强震孕育风险。前人研究发现银川盆地下方存在着大规模的低阻体,这对于理解贺

兰山-银川盆地的形成机制具有重要意义,因此北部电性结构的研究显得十分重要。

#### 4 结论

1)本次大地电磁法工作通过利用近参考处理技术、阻抗张量分解技术以及 NLCG 方法,进行二维反演计算,获得了在较强人文干扰区可靠的深部电性结构模型。该模型揭示了与大地构造较为一致的电性结构分区特征;银川盆地北部上地壳主要为中、低阻特性,对应为巨厚新生界,上地壳之下为低阻特征。结果表明,大地电磁测深是探测区域隐伏断层,地震区孕震环境以及与地热成因有关的地质结构的地球物理测深方法。

2)研究区自西向东电性结构分块性明显,主要表现为贺兰山东麓断裂和黄河断裂控制着整个盆地的边界;西端阿拉善地块和东端鄂尔多斯地块为较为稳定的高阻特性,盆地内部断裂发育,对盆地内部的隐伏断裂银川断裂和芦花台断裂均有显示。

3)研究了存在向深部延伸的大规模低阻体,推断其为幔源物质的上涌。研究区整体电性上表现为山脉高阻体和盆地低阻体的盆山构造特征。深部异常的高导通道很可能是黄河断裂的导热根本通道以及引起以往地震活动的主要原因。

#### 参考文献:

- [1] 葛肖虹, 马文璞. 中国区域大地构造学教程[M]. 北京:地质出版社, 2014.  
GE X H, MA W P. Textbook of regional geotectonics of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014.
- [2] 陈晓晶, 虎新军, 仵阳, 等. 鄂尔多斯西缘中段断裂体系特征研究[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(11): 95-98.  
CHEN X J, HU X J, WU Y, et al. Study on characteristics of the fracture system in the middle segment of the western margin of Ordos[J]. Technology Innovation and Application, 2024, 14(11): 95-98.
- [3] 李清河, 郭守年, 吕德徽. 鄂尔多斯西缘与西南缘深部结构与构造[M]. 北京:地震出版社, 1999.  
LI Q H, GUO S N, LYU D H. Deep structure and tectonics of the western and southwestern margins of Ordos [M]. Beijing: Seismological Press, 1999.
- [4] 陈晓晶, 虎新军, 李宁生, 等. 银川平原基于地球物理资料三维建模的深部地质构造研究[J]. 物探与化探, 2020, 44(2): 245-253.  
CHEN X J, HU X J, LI N S, et al. Research on the deep geological structure in Yinchuan Plain: 3D modeling based on geophysical data [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2020, 44(2): 245-253.
- [5] 李宁生, 虎新军, 杜鹏, 等. 银川平原深部构造特征及断裂活动性研究[M]. 北京:地质出版社, 2020.  
LI N S, HU X J, DU P, et al. Deep tectonic characteristics and fault activity in Yinchuan Plain [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2020.
- [6] 尹秉喜, 闵刚. 宁夏中上地壳电性结构特征研究[M]. 银川:黄河出版传媒集团阳光出版社, 2014.  
YIN B X, MIN G. Electrical structure characteristics of the upper-middle crust in Ningxia [M]. Yinchuan: Yellow River Publishing & Media Group Sunshine Press, 2014.
- [7] 赵凌强, 孙翔宇, 詹艳, 等. 贺兰山-银川盆地三维深部电性结构特征及其地球动力学意义[J]. 中国科学:地球科学, 2023, 53(3): 481-496.  
ZHAO L Q, SUN X Y, ZHAN Y, et al. Characteristics of the three-dimensional deep electrical structure in the Helan Mountains-Yinchuan Basin and its geodynamic implications [J]. Science China Earth Sciences, 2023, 53(3): 481-496.
- [8] 朱怀亮, 刘志龙, 曹学刚, 等. 银川盆地东缘地热资源勘探远景评价—基于大地电磁测深和钻探探测[J]. 地质与勘探, 2020, 56(6): 1287-1295.  
ZHU H L, LIU Z L, CAO X G, et al. Exploration prospect of geothermal resources in the eastern margin of Yinchuan Basin: Magnetotelluric sounding and drilling confirmation [J]. Geology and Exploration, 2020, 56(6): 1287-1295.
- [9] 朱怀亮, 胥博文, 刘志龙, 等. 大地电磁测深法在银川盆地地热资源调查评价中的应用[J]. 物探与化探, 2019, 43(4): 718-725.  
ZHU H L, XU B W, LIU Z L, et al. The application of magnetotelluric sounding to geothermal resources assessment in Yinchuan Basin [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43(4): 718-725.
- [10] 曹学刚, 程国强, 李龙亮. MT法在银川平原黄河东岸地热资源调查评价中的应用[J]. 西部探矿工程, 2021, 33(1): 141-144.  
CAO X G, CHENG G Q, LI L L. Application of Magnetotelluric (MT) method in the investigation and evaluation of geothermal resources on the east bank of the Yellow River in Yinchuan Plain [J]. West-China Exploration Engineering, 2021, 33(1): 141-144.
- [11] 王银, 孟广魁, 柴焯章, 等. 隐伏活断层探测中的精确定位技术—以银川盆地芦花台断裂为例[J]. 地震地质, 2015, 37(1): 256-268.  
WANG Y, MENG G K, CHAI C Z, et al. The accurate location methods for buried active fault exploration: an

- example of Luhutai faults in Yinchuan Graben [J]. *Seismology and Geology*, 2015, 37(1): 256-268.
- [12] 胥博文, 刘志龙, 张敏, 等. MT法在石嘴山市地热资源勘查中的利用[J]. *山东理工大学学报(自然科学版)*, 2018, 32(5): 46-52.
- XU B W, LIU Z L, ZHANG M, et al. Application of magnetotelluric in geothermal resources exploration in Shizuishan [J]. *Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 32(5): 46-52.
- [13] 汪琪, 赵志鹏, 尹秉喜, 等. 电磁测深MT法在平原深部地热调查中的应用[J]. *工程地球物理学报*, 2016, 13(6): 782-787.
- WANG Q, ZHAO Z P, YIN B X, et al. The application of Magnetotelluric Sounding (MT) method to deep geothermal investigation in plain [J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2016, 13(6): 782-787.
- [14] 高亮, 陈海波, 李向宝, 等. 综合电磁法在银川盆地地热资源勘查中的应用[J]. *山东理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 27(3): 62-66.
- GAO L, CHEN H B, LI X B, et al. Application of integrated electromagnetic methods in exploration of geothermal resource in Yinchuan Basin [J]. *Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition)*, 2013, 27(3): 62-66.
- [15] 刘少光, 徐正玉, 谢石文. 参考道技术在大地电磁测深数据处理中的应用效果分析[J]. *科技视界*, 2015(8): 128-129.
- LIU S G, XU Z Y, XIE S W. Analysis on the application effect of remote reference technique in Magnetotelluric sounding data processing [J]. *Science & Technology Vision*, 2015(8): 128-129.
- [16] 胡祥云, 林武乐, 杨文采, 等. 克拉通岩石圈电性结构研究进展[J]. *中国科学: 地球科学*, 2020(50): 128-129.
- HU X Y, LIN W L, YANG W C, et al. A review on developments in the electrical structure of craton lithosphere [J]. *Science China Earth Sciences*, 2020(50): 128-129.
- [17] 赵红格, 刘池洋, 王锋, 等. 贺兰山隆升时限及其演化[J]. *中国科学D辑: 地球科学*, 2007(37): 185-192.
- ZHAO H G, LIU C Y, WANG F, et al. Uplift time constraints and evolution of Helan Mountain [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007(37): 185-192.
- (责任编辑 王利君)
- 
- (上接第76页)
- [14] 黄云, 张清华, 卜一之, 等. 港珠澳大桥正交异性钢桥面板纵肋现场接头疲劳特性[J]. *中国公路学报*, 2016, 29(12): 34-43+59.
- HUANG Y, ZHANG Q H, BU Y Z, et al. Fatigue properties on field splice joints of longitudinal ribs in orthotropic steel bridge decks of Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2016, 29(12): 34-43+59.
- [15] 焦驰宇, 刘陆宇, 龙佩恒, 等. 城市曲线梁桥爬移现象及解决措施研究[J]. *工程力学*, 2015, 32(S1): 177-183.
- JIAO C Y, LIU L Y, LONG P H, et al. Study on "creeping" phenomenon of curved continuous girder bridges [J]. *Engineering Mechanics*, 2015, 32(S1): 177-183.
- (责任编辑 周雪梅)