

闵刚, 程建华, 尹秉喜, 等. 宁南弧形构造带甘肃大沟—内蒙古乱井中上地壳电性结构[J]. 中国地质, 2014, 41(5): 1464–1475.

Min Gang, Cheng Jianhua, Yin Bingxi, et al. The conductivity characteristics of Dagou–Luanjing middle and upper crust in Southern Ningxia arc structure[J]. *Geology in China*, 2014, 41(5):1464–1475(in Chinese with English abstract).

宁南弧形构造带甘肃大沟 —内蒙古乱井中上地壳电性结构

闵刚^{1,2,3} 程建华¹ 尹秉喜⁴ 蔡学林³ 夏时斌³

(1.宁夏回族自治区地质矿产勘查开发局,宁夏银川750021;2.中国地质大学(北京),北京100083;
3.成都理工大学地球探测与信息技术教育部重点实验室,四川成都610059;4.宁夏回族自治区地质调查院,宁夏银川750021)

摘要:利用大地电磁探测方法在宁南弧形构造带内蒙古乱井—甘肃大沟段进行了中上地壳电性结构特征研究,通过二维反演获得了研究区的电性结构模型,模型清楚揭示出了该区典型的电性结构特征:(1)中上地壳电性结构整体表现为“碎块状”的构造特征,其中走廊构造带总体表现为相对低阻,北祁连碰撞造山带总体表现为相对高阻;(2)海原地震震源区的震源断裂所反映的低阻带构造样式既不像走滑断裂那样陡峭,也不像逆冲断裂那样平缓,而是兼具走滑与逆冲断裂带的双重特征;(3)研究区壳内低阻层呈现不连续分布,总体表现为南深北浅的构造样式,一般都终止于高阻地块边缘或与逆冲推覆构造的滑脱面相交汇处;(4)清水河裂褶带内发育的高阻地块可能为晚古生代或早中生代发育在元古宙基底上的古隆起,为该区燕山期构造运动提供了深部大地电磁资料证据。

关键词:宁南弧形构造带;大地电磁探测;电性结构;壳内低阻层;古隆起;滑脱面

中图分类号: P545 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000–3657(2014)05–1464–12

1 引言

宁南弧形构造带地处青藏高原向北东生长的前锋地区,其构造变形为青藏高原隆升过程中的远程效应,加上新生代以来形成的典型挤压盆山构造格架未遭受过多的改造作用^[1–3],使该区成为地质地球物理学家研究高原隆升机制的热点区域。研究区处于第四系活动构造的地震频发区域^[4],1920年发生过海原8.0级大地震;同时,迄今在卫宁北山、西华山及南华山浅部区域发现了以Au、Cu、Pb、Zn为主的小型多金属矿产和矿点^[5],浅部矿床的密集发育往往预示该区同一构造单元内可能存在相同

成矿环境的深部大型矿床,深部矿产的富集往往与主成矿期构造区域内的韧性剪切带、深大断裂、逆冲推覆构造密切相关^[6–8]。基于以上原因,20世纪80年代以来,广大科技工作者在宁南弧形构造带开展了大量的地球物理调查工作,特别是赵国泽、詹燕、汤吉等^[4,9–10]研究成果对了解宁南弧形构造带深部结构做出了重要贡献,但是在横跨卫宁北山与西、南华山的区域,缺少一条能精细反映其深部结构特征的剖面,严重制约了对该区动力学机制的研究、地震机理研究及深部矿产远景调查工作。

大地电磁法(MT)具有勘探深度大,不受高阻屏蔽,对低阻分辨能力强,勘探成本低等优点,在构

收稿日期:2013–08–27;改回日期:2014–04–29

基金项目:中国地质调查局项目(1212011120928)资助。

作者简介:闵刚,男,1983年生,讲师,博士,主要从事大地电磁正反演及构造地质学的科研教学工作;E-mail:mg-s1983827@163.com。

造复杂区域的深部地质调查中发挥着重要作用。本文依托中国地质调查局项目“宁夏大地电磁测深剖面测量”,通过在研究区开展横跨海原边界带、香山逆冲推覆构造及卫宁北山区域的大地电磁勘探,采用最新带地形二维 NLCG 反演技术获得深度为 30 km 的甘肃大沟—内蒙古乱井二维电性结构剖面,开展地质地球物理综合研究,查明了研究区中上地壳壳内低阻层及滑脱面的空间展布规律,基本摸清了研究区的逆冲推覆构造、深大断裂的深部构造样式,为中上地壳变形机制研究、深部矿产勘探及中强地震孕震机制研究提供了技术支撑。除上述剖面外,作者还联合宁夏回族自治区地质调查院在弧形构造南部汇聚处及东西向、北东向布置了多条大地电磁测深剖面,部分研究成果已经发表^[1],部分成果即将发表。

2 大地构造及资料采集

2.1 研究区大地构造

宁南弧形构造带位于青藏高原东北缘,由北西向南东构造走向从近东西向转为近南北向,总体呈现出向北东突出的构造样式^[2]。以青铜峡—固原深大断裂为界,东与鄂尔多斯地块相接,北邻阿拉善地块,西南以海原深大断裂为界与祁连山碰撞造山带相邻。受新生代以来青藏高原整体隆升区域构造应力场的控制,宁南弧形构造带受到 NE-SW 向挤压、东部右旋走滑及西部左旋走滑的共同作用而发育弧形构造带,由弧形山地和其间的平原组成弧形构造地貌格局^[3],表现为卫宁北山、香山、烟筒山、西南华山、崛吴山及月亮山断块山间挟持中卫—同心断陷盆地、西吉坳陷盆地及海原—兴仁堡坳陷盆地。弧形构造带往东南收敛于六盘山腹地的小关山和大关山一带,往北西方向逐渐发散,到卫宁北山往西表现为近于平行的东西向构造格局体系(图1)。研究区在前震旦纪属于古中国大陆;震旦—寒武纪属于被动大陆边缘沉积;奥陶纪时演变为活动大陆边缘沉积;志留—泥盆纪弧形构造区域进入碰撞造山作用,发育残留海盆和陆相磨拉石沉积;石炭纪开始陆内造山作用,发育多种类型的沉积建造^[4];新生代以来的构造运动以拉张伸展与逆冲推覆运动为主。总之,研究区经历多期次的构造运动,具备发育大型热液矿床的大地构造背景,大

型断裂带与逆冲推覆构造为热液矿的运移及富集提供了有利条件。

2.2 野外数据采集

剖面走向为近南北向,北起内蒙古自治区乱井滩,向南经中卫市、兴仁镇、靖安乡、黄峽乡至甘肃大沟乡,穿过大井隐伏断裂带、天景山断裂带、大庙—兴仁断裂带、西海原—海原—六盘山断裂带、崛吴山—月亮山断裂带、郭城驿—苏堡断裂带等大型断裂带。横跨卫宁北山—罗山坳褶带、中卫—同心断陷带、兴仁堡—海原坳陷盆地、西华山—六盘山隆褶带及靖远—西吉坳陷带等主要构造单元,平均观测点距 2 km,大地电磁测深点共计 111 个,剖面全长 220 km。实测剖面位置见图 1。

野外数据采集工作采用加拿大凤凰(Phoenix)公司 V8 多功能电法仪,其配置的 MTC-50 大地电磁专用磁棒频率范围为 400 Hz 到 0.0002 Hz。项目组于 2011 年 9—11 月进行了为期 3 个月的大地电磁测深(MT)野外剖面测量,资料采集记录了大地电磁 5 个分量时间序列。在开工前对磁传感器及时间序列采集仪器进行了标定,同时,为保证本次数据采集的真实可靠性,每当测线在北纬方向横跨距离超过 1°时,就重新对仪器及磁棒进行标定。项目组在开工前选择一处干扰较小的地方进行了试验采集,初步确定了磁道与电道增益、滤波系数及采集时间等参数,当测点记录时间均超过 12 h,观测频率范围为 0.003125 ~ 3636.4 s 时,一维反演结果能较好地反映研究区 30 km 以浅的深部电性结构特征,当研究区地层结构及干扰环境发生较大变化时,相应采集参数也会随之进行调整。为了满足 TE 极化与 TM 极化的要求,在进行电极与磁棒布设时,尽量与构造走向垂直或者平行,实验区卫宁北山区域电极布置方向为南北与东西向布置;其余区域电极布置方向为 NW-SE 向、NE-SW 向。

3 大地电磁资料定性分析

原始时间序列数据预处理采用由加拿大凤凰工作(Phoenix)提供的 SSMT2000 数据处理软件进行,将观测的时间序列数据经过傅立叶变换,得到电磁场的自、互功率谱,然后利用最小二乘法计算出视电阻率、视相位及最佳主轴方位角等定性参数。原始数据携带了地下介质对大地电磁波的响

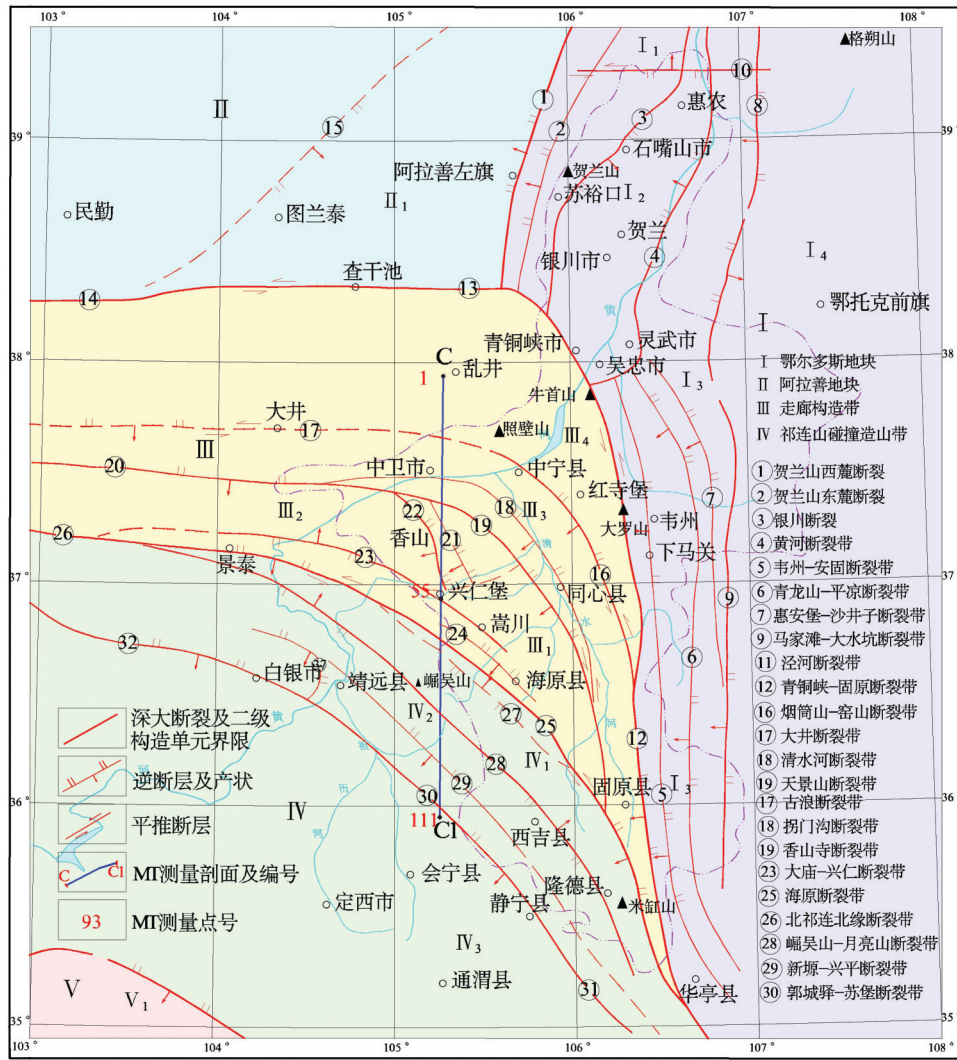


图1 研究区大地构造及MT测深剖面位置图
Fig.1 Tectonic map and location of the magnetotelluric sounding

应信息,通过观察分析原始观测视相位、视电阻率曲线形态和数值变化可以大致了解沿剖面方向的大地构造结构与地下电性结构特征,结合分析研究区的大地构造背景,指导后续地质地球物理综合解释;通过分析沿剖面方向不同测点不同频率的电性主轴方位角,可以评估野外数据采集方式的合理性,指导张量阻抗的校正,亦能间接了解沿剖面方向地下结构的二维及三维性,选择合适的反演算法进行反演计算。

3.1 定性参数理论计算

通过计算传输函数(倾子矢量和阻抗张量)可

以提取出大地电磁(MT)实测数据中许多定性分析参数^[3,14],就可以进一步计算出许多反映实际地电结构特征的不变量参数^[3,14]。本文利用最小二乘估算方法计算传输函数,传输函数的理论计算公式在频率域可以写为:

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \\ E_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \\ T_{zx} & T_{zy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (公式1)$$

其中, $Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy}$ 代表阻抗张量的4个元素, E_x, E_y, E_z, H_x 和 H_y 分别代表电场和磁场分量, T_{zy}, T_{zx} 分别不同方向的磁场倾子元素。假设以 A, B 分别

代表电场和磁场各分量,把它们与公式1一起进行参数替换计算,则有:

$$\begin{bmatrix} \langle E_x A^* \rangle \\ \langle E_y A^* \rangle \\ \langle E_z A^* \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \\ T_{zx} & T_{zy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \langle H_x A^* \rangle \\ \langle H_y A^* \rangle \end{bmatrix} \quad (公式2)$$

$$\begin{bmatrix} \langle E_x B^* \rangle \\ \langle E_y B^* \rangle \\ \langle E_z B^* \rangle \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \\ T_{zx} & T_{zy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \langle H_x B^* \rangle \\ \langle H_y B^* \rangle \end{bmatrix} \quad (公式3)$$

在上面的式子中 $\langle XY^* \rangle$ 表示功率谱的平均值。通过对式2与3进行求解,便可以获得传输函数(阻抗张量和倾子矢量)的值,当非远参考观测时,并且场源满足非线性极化,阻抗参考场(A,B)有4种可以给出稳定解的组合,它们分别是: (H_x, H_y) 、 (H_x, E_x) 、 (E_y, H_y) 和 (E_x, E_y) ,而倾子则只能取一种,即 (H_x, H_y) 。

通过数学计算,进而求得可以计算出单个频点对应的卡尼亚视电阻率、阻抗相位及Swift最佳主轴方位角。视电阻率与阻抗相位反映剖面深部物质状态及构造特征,通过对其进行综合分析能确定深大断裂空间展布、构造边界、目标岩体或地层单元的物性状态与分布规模;最佳主轴方位角是一个常用的不变量参数,主要用于确定研究区的电性构造走向情况,为地质地球物理解释及评价测线布置合理与否提供依据。

3.2 电阻率与相位断面图分析

图2为甘肃大沟—宁夏香山—内蒙古乱井剖面的单点测深曲线与视电阻率断面图,单点测深曲线由左至右依次经过中祁连隆褶带、西华山—六盘山

隆褶带、兴仁堡—海原坳陷带、香山隆褶带及卫宁北山—罗山隆褶带。由单点测深曲线的形态特征可以看出,在中祁连隆褶带内,Rxy模式与Ryx模式的视电阻率曲线形态与幅值趋于重合,说明在中祁连隆褶带,中上地壳深部结构相对稳定,无大的构造变形,单点测深电阻率曲线由高频到低频,即由浅层到深部表现为低阻—高阻—低阻—高阻的电性结构;西华山隆褶带内Rxy与Ryx 2个极化模式的单点测深曲线形态一致,主体电阻率曲线为由高频到低频,即由浅层到深部呈现低阻—高阻—低阻—高阻的电性结构,首支电阻率值相对较大,说明在该区地表新生代覆盖层较薄;兴仁堡—海原坳陷带内的视电阻率曲线幅值较低,在深部Rxy与Ryx出现分离,表现为较强的各向异性,说明在新生代覆盖层下构造变形较强烈;香山隆褶带内视电阻率曲线表现为高阻特征,且表现为较强的各向异性,与该区发育系列逆冲断裂的地质事实符合;在卫宁北山—罗山隆褶带内,单点测深曲线表现为K型特征,320~5 Hz表现为高阻特征,5~0.001 Hz电阻率逐渐下降,总体表现为低阻特征。

从甘肃大沟—宁夏香山—内蒙古乱井大地电磁剖面相位资料断面图(图3)可以看出,沿剖面方向的深部结构整体表现为三层结构特征,中间的相位低值层推测为壳内低速、高导层的表现。壳内低速高导层沿剖面方向大致可以分为三段,第一段处于0~60 km,对应中祁连隆褶带与靖远—西吉盆地;第二段处于70~115 km,对应西华山—月亮山隆褶带与兴仁坳陷带,且在兴仁坳陷带,壳内低速

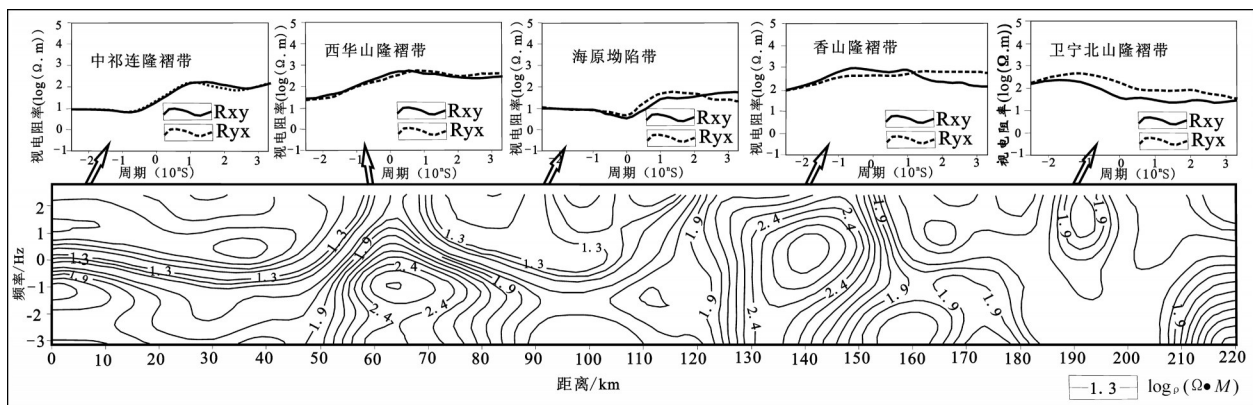


图2 甘肃大沟—内蒙古乱井大地电磁测深视电阻率(Rxy)资料断面图
Fig.2 Apparent resistivity profile (Rxy) of magnetotelluric sounding of Dagou-Luanjing

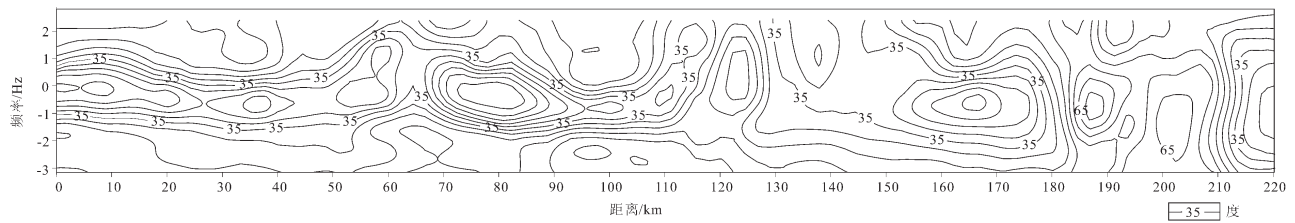


图3 甘肃大沟—内蒙古乱井大地电磁测深视相位资料断面图
Fig.3 Phase profile of magnetotelluric sounding of Dagou-Luanjing

高导层出现向地表延伸的趋势;第三段在145~180 km,对应香山隆褶带;在卫宁北山及周缘地区,相位断面图形态无明显规律,说明该区地层较复杂,经历了较强的构造变形。通过分析视相位等值线图的分布规律,基本摸清了研究区构造特征及壳内低阻层的分布范围与分布规律,为进一步的定量解释提供了可靠依据。

3.3 最佳主轴方位角分析

为了直观地了解研究区由浅部到深部构造的走向及变化规律,把甘肃大沟—内蒙乱井剖面320 Hz、2.03 Hz、0.01 Hz、0.004 Hz及0.0008 Hz 5个频率的最佳电性主轴方位角投影到宁夏弧形构造带的构造区带图上(图4)。以下将分构造单元详细解剖最佳电性主轴的从高频到低频(即由浅部到深部)的空间变化特征,分析研究区深部构造的变形程度及主要构造单元的空间样式,为张量阻抗校正及选择合适反演算法提供理论依据及指导大地电磁资料的定量解释。

大井断裂带(F_{17}):电性主轴方位在320 Hz和2.03 Hz表现为近东西向,与构造走向一致;在0.01 Hz、0.004 Hz及0.0008 Hz 主轴方位角无明显的指向,变化较剧烈。主轴方位角的上述变化特点说明大井断裂为具有一定深度的隐伏断裂带,且断裂的规模较大,实际地质资料也得出大井断裂为烟筒山断裂带向西延伸的隐伏部分。

天景山断裂带(F_{19}):电性主轴方位角在320 Hz表现为近东西向;在2.03 Hz、0.01 Hz及0.004 Hz 主轴方位角无明显指向,表现的杂乱无章;当频率变为0.008 Hz时,电性主轴方位角再次表现为具有明显指向。主轴方位角在天景山断裂带附近的变化规律表明在天景山断裂带浅部具有一定厚度的沉积地层,频率为2.03 Hz至0.004 Hz左右所对应的深度范围内构

造较为发育,构造变形严重,当深度继续加大时,构造在此表现为具有明显走向的二维构造特征,间接说明了香山逆冲推覆体下部构造较稳定。

海原断裂带(F_{25}):电性主轴方位除在320 Hz具有一定的指向(北西向)外,其余4个频点所对应的电性主轴方位都没有明显的指向,说明海原断裂带构造变形严重,且断裂带规模较大,一直到0.0008 Hz所对应的深度范围内都没有消失的趋势,与海原断裂带向深部延伸至壳内低阻高导层的客观事实相吻合。

香山逆冲推覆体:在香山逆冲推覆体内分布着天景山断裂带(F_{21})、拐沟门断裂带(F_{21})和香山寺断裂带(F_{22})等逆冲断裂带。分析拐沟门断裂带(F_{21})和香山寺断裂带(F_{22})对应的最佳主轴方位角,可以看到在320 Hz和2.03 Hz的主轴方位角表现杂乱外,0.01~0.0008 Hz范围内主轴方位角的指向北西方向。结合天景山断裂带电性主轴方位角的分布规律,可以知道在香山逆冲推覆体范围内,拐沟门断裂带(F_{21})和香山寺断裂带(F_{22})相对天景山断裂带规模较小,延伸深度较浅。

综合上述分析结构,甘肃大沟—内蒙乱井剖面各构造单元内测点电性主轴方位角比较一致,由高频到低频都在北西 $30^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 变化。由于主轴方位角具有 90° 模糊性的特点^[14],故需要结合宁夏弧形构造带内已知的地质构造走向资料来加以约束;从构造单元图(图1)上可以看到,除大井断裂周缘地块为近东西向外,构造走向均为近北西向或北北西向。故笔者认为研究区的构造走向为北西 $30^{\circ}\sim 80^{\circ}$ 变化,表明野外数据采集时的电极布置方向基本与构造走向垂直或平行,观测方式基本满足TE极化或者TM极化条件,所得资料能较真实反映地下电性结构特征,可以采用二维非线性共轭梯度(NLCG)对数据进行反演。

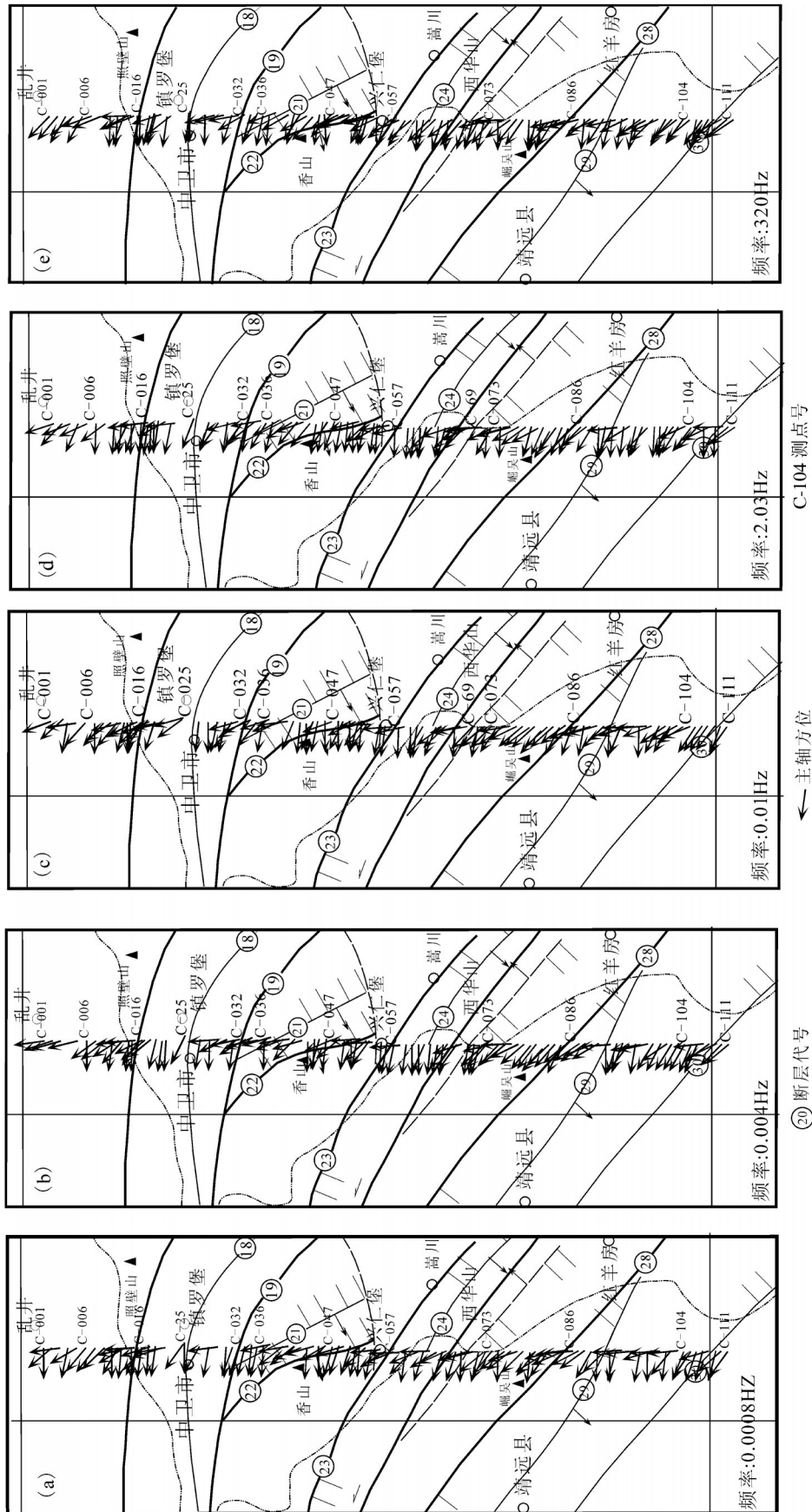


图4 甘肃大沟—宁夏香山—内蒙古乱井剖面最佳电性主轴方位角(不同频率)分布图
 Fig.4 Distribution of the best electrical spindle azimuth (different frequencies) along the Dagou—Xiangshan—Luanjing profile

4 大地电磁测深剖面解释

经过电性主轴分析及张量阻抗校正获得的视电阻率曲线,后期处理及反演采用成都理工大学开发的MTsoft 2.0进行,首先对经过飞点处理及静态校正后的视电阻率数据进行一维TE和TM模式Occam联合反演,并将其作为二维反演的初始模型,然后采用稳定、收敛速度快的非线性共轭梯度法(NLCG)进行二维反演,获得了研究区较详细的电性结构剖面。然后针对二维剖面上分辨率较差的部位,用特定频段进行大比例尺反演计算,进一步提高电性剖面对局部异常体的分辨率。从不同尺度解释出的断裂分布特征与地块深部电性结构特征与前述视电阻率单点测深曲线分析结果基本一致,而且更加清晰地呈现了沿剖面方向主要断裂带在中上地壳的空间展布特征及各构造单元的深部结构特征。

4.1 多尺度大地电磁资料反演结果分析

在全频段全剖面数据反演得到的二维大地电磁电性剖面中(图5),可以解释出沿剖面方向的大型构造单元与断裂边界带,如海原边界带及其为边界的祁连山碰撞造山带、走廊构造带,但是对于香山推覆体内的叠瓦式逆冲断层及卫宁北山区域

的大井断裂(F_{17})等,在图5-C的电性剖面中体现不出明显的电性差异带,无法对这些断裂或构造单元进行更加精细(大尺度)的剖析。这时,利用大地电磁分频反演技术,选择重点区域的高频数据(320~0.01Hz)进行二维非线性共轭梯度(NLCG)反演,可以得到更高精度的局部二维电性结构,结合大地电磁全频段全剖面反演得到的二维电性剖面进行多尺度的大地电磁综合解释,就可以从不同尺度对大地电磁资料进行精细解释,多尺度反演结果见图5。

从香山逆冲推覆区的电性结构(图5-A)可以为断层的划分及深部展布样式找到更加精细的电性结构证据,如断层 F_{22}^2 在剖面上就表现为明显的电性梯度带。从图5-C看到,隐伏断裂大井断裂带(F_{17})所形成的低阻电性差异带表现不明显,但是在图5-B所示高频段数据反演得到的二维电性剖面中,大井断裂带具有与两侧明显的电性差异且表现为倾向北向南逆冲推覆的反冲断层构造样式;断层 F_{40} 为发育在逆冲构造上的反冲断层,根据在该区发现有小范围玄武岩分布的事实及古地磁研究成果^[11],推测该断层在中中新世经受了拉张伸展运动,并在该区形成了典型的拉张盆地。综上所述,通过选择重点区域开展多尺度反演,能为大地电磁资料的精细解释提供更多依据。

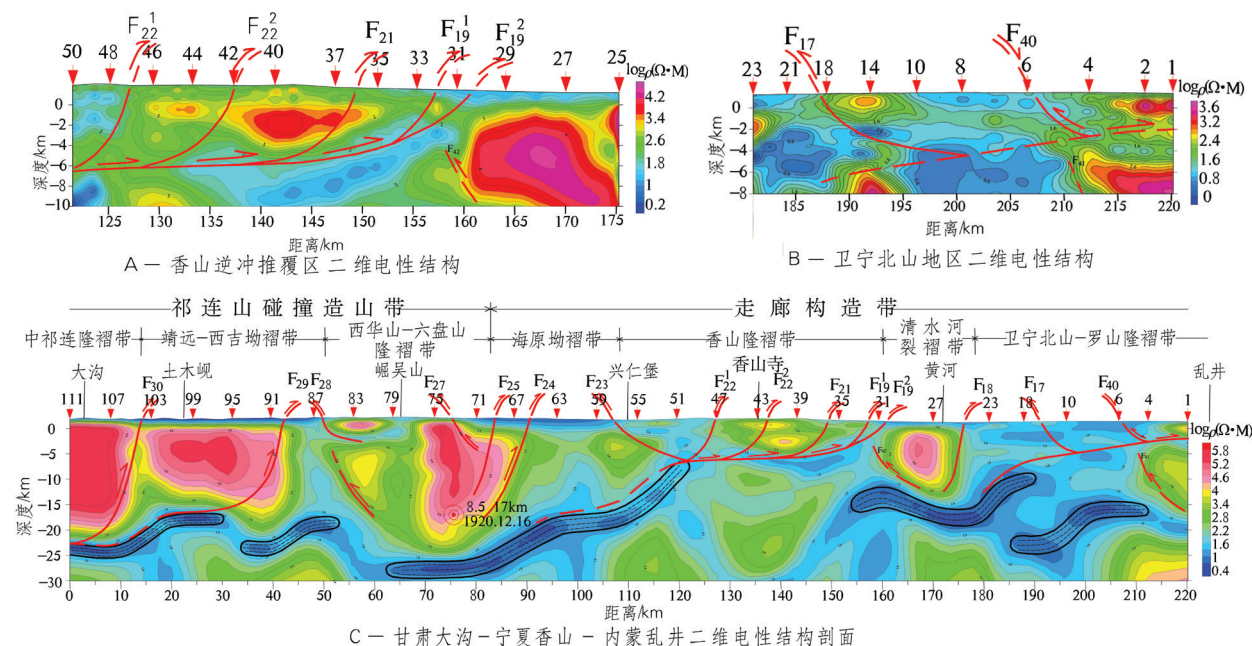


图5 甘肃大沟—内蒙古乱井剖面多尺度大地电磁反演结果

Fig.5 Magnetotelluric inversion results of Dagou-Luanjing profile based on different scales

4.2 甘肃大沟—内蒙乱井中上地壳电性结构特征

依托大地电磁多尺度反演结果(图5),可以发现沿剖面方向,深部结构表现为“碎块”状的构造特点,结合分析沿剖面方向的地质剖面及前人对研究区的构造单元划分成果等资料,解析出了沿剖面方向的断裂带、构造单元与壳内低阻层的深部构造样式,具体划分成果见图6,沿剖面方向电性结构图以沙沟河隐伏断裂(F_{25})为界表现为明显的电性差异,南部在大地构造上属于祁连山碰撞造山带,除发育断裂的区域外,整体表现为高电阻率的稳定地块特征;北部在大地构造上属于走廊构造带,整体表现为低电阻率且在横向与纵向上分布极不均匀的电性结构特征。

祁连山碰撞造山带以郭城驿—苏堡断裂带(F_{30})、崛吴山—月亮山断裂带(F_{28})为界,可以分为中祁连隆褶带、靖远—西吉拗褶带及西华山—六盘山隆褶带。中祁连隆褶带电性结构较为稳定,地表为1 km左右的新生代覆盖层,往下1~23 km为稳定的高阻地块,壳内低阻、高导层在23~26 km深度平缓分布;靖远—西吉拗陷带地表新生代覆盖层厚度较大,最厚处可以达到3 km左右,往下是厚度较大的高阻稳定地块,厚度达到15 km左右,推测其可能为中元古界结晶基底、中地壳花岗岩层的反映,高阻地块下面的壳内低阻地层在20~27 km深部内呈现起伏分布;西华山—六盘山隆褶带构造较为复杂,其南部电性结构横向与纵向都表现为不均匀分布的特点,发育多条次级断层,构造变形较剧烈,北部从地表一直到27 km左右的范围内发育稳定的高阻地块,高阻地块下面发育壳内低阻地层,值得注意的是该构造带北部边界发育的海原断裂带(F_{25})与沙沟河隐伏断裂(F_{24})表现为上陡下缓、总体较陡立的构造样式,其所形成的低阻带在空间上既不像走滑断裂那样陡峭,也不像逆冲断裂那样平缓,而是兼具走滑与逆冲的双重特征,海原8.0级地震^[10]在剖面上的投影位置位于高阻地块边缘的电性梯度带上,上述构造特点为进一步研究海原地震的深部孕震环境及发震机制提供了地球物理证据。

走廊构造带以大庙—兴仁断裂带(F_{23})、天景山断裂带(F_{19})及大井断裂带(F_{17})为边界,进一步划分为兴仁堡—海原拗褶带、香山隆褶带、清水河裂褶带及卫宁北山—罗山隆褶带等次级构造单元。兴

仁堡—海原拗陷带沿剖面方向浅部新生代覆盖层较厚,整体表现为南深、北浅的空间分布规律,北部的沉积地层较薄,大概为1400 m左右,往南沉积盖层逐渐增厚,在西华山东麓与兴仁堡—海原盆地的逆地堑式拗陷,沉积盖层的厚度最深可达4000 m以上,盆地基底为白垩纪地层,基底面由南西往北东隆起,形成了一个较平缓的大单斜,为典型的逆冲构造系统,下部的壳内低阻层与西华山—六盘山隆褶带深部的壳内低阻层一起表现为南深北浅的构造样式,且与香山隆褶带内的滑脱面相交汇;香山隆褶带内电性结构表现为不均匀分布的特征,该区发育多条次级断层,构造变形较剧烈,7 km左右以浅的地层为由古生代地层组成的逆冲推覆体,推覆体下面发育晚古生代或中生代滑脱面地层,且与海原拗陷带内的壳内低阻层相交汇;清水河裂褶带构造相对较稳定,浅部被厚度为1.2 km左右的新生代地层所覆盖,在新生代地层下面发育15 km左右的高阻地块,高阻地块下面展布厚度为4 km左右的壳内低阻高导地层;卫宁北山—罗山隆褶带内的电阻率整体表现为低阻,电阻率横向和纵向均呈现不均匀分布,图5-C对该区深部结构的反映分辨率较低,通过分析图5-B大比例尺大地电磁资料反演结果,发现卫宁北山在此区带表现为相对高阻特征,与该区航磁异常的中心区域较吻合,其地质意义有待进一步分析,内蒙乱井及周缘区域地下电阻率成层性较好,表现为明显的六层电性结构。

4.3 研究区中上地壳电性结构的地质涵义

通过对大地电磁测深资料的地质综合解释和分析发现,走廊构造带相比于祁连山碰撞造山带,整体表现为相对低阻的特征。研究区中上地壳电性结构剖面显示出高阻与低阻地块相间排列及分布其间的电性梯度带,表现为“碎块状”的构造样式,且在深部断续存在壳内低阻高导低速地层,是研究区中上地壳有别于层状电性结构和块状电性结构的最基本电性结构特征,上述电性结构如果普遍存在于整个宁南弧形构造区,对宁南弧形构造区中强地震频发的深部构造背景的研究会有较大的指导意义。

海原断裂带深部电性结构表现为具有一定宽度的低阻异常,且呈现出上陡下缓的构造样式,兼具走滑与逆冲的双重特征。震源位置处于电性强

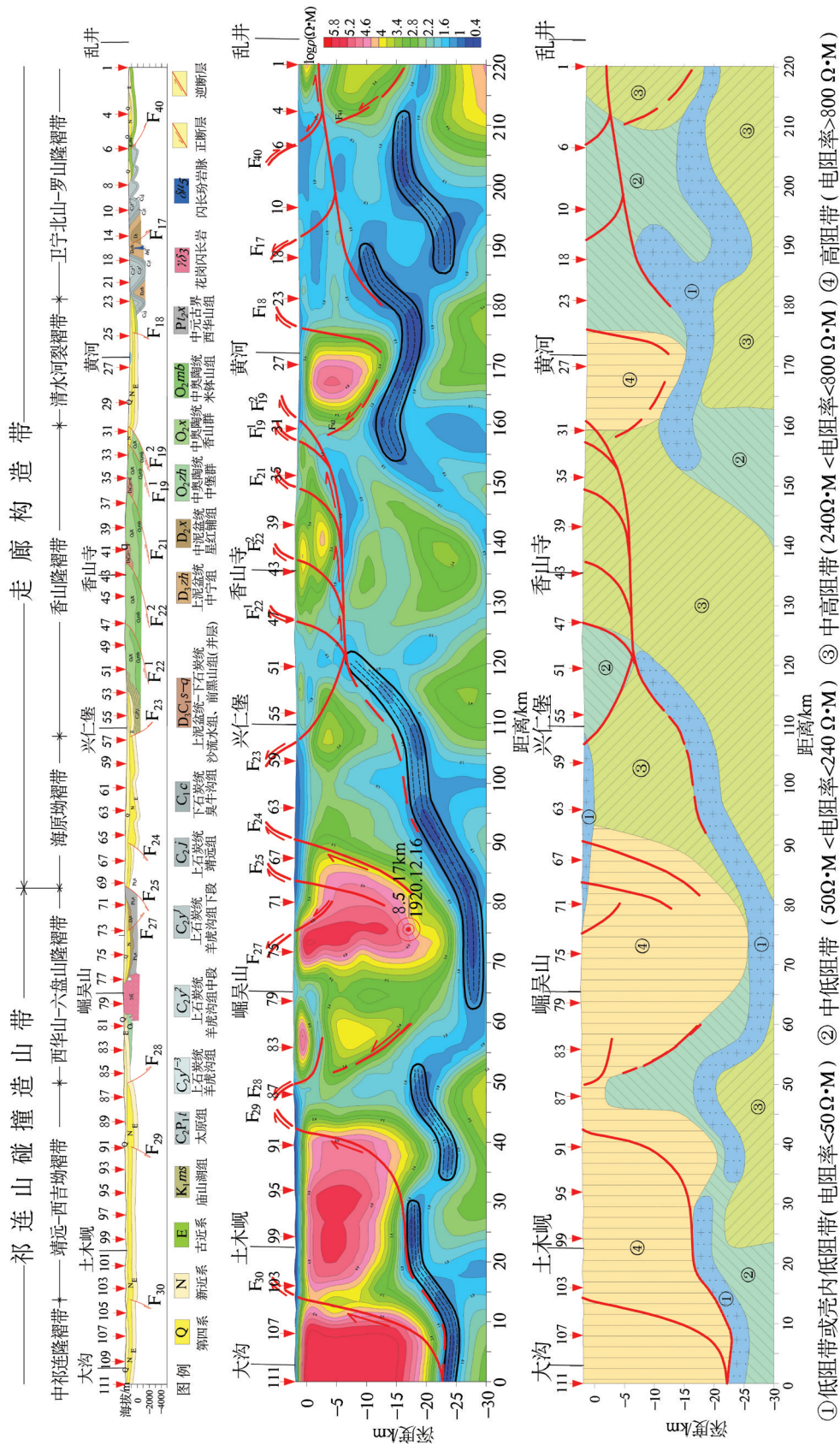


图6 甘肃大沟—宁夏香山—内蒙乱井地质剖面图和二维电性结构解释图

烈变化的区域,即处于强电性梯度带中靠近高阻地块的一侧,西南侧的高阻地块由奥陶纪变质砂岩、石英岩和加里东造山期花岗岩等组成,这种刚性和整体性都较好的岩石,为弹性应变能量的积累提供了很好的条件,同时根据解析出的断裂分布图,发现在震源断裂附近存在低阻高导地层,该地层可以为能量的聚集提供通道。当青藏高原向北东生长时,遇到稳定的阿拉善地块或鄂尔多斯地块的阻挡,能量通过壳内低阻层传输到刚性高阻地块周缘聚集,当能量聚集到某阈值后,就会沿岩石相对脆弱处释放,引发地震。

壳内低阻层断续分布在研究区各个构造单元内,且表现为南深北浅的构造样式,在走廊构造带内,兴仁堡—海原拗陷带深部发育的壳内低阻层表现为往地表延伸的构造特点,且与香山逆冲推覆体下的晚古生代或早中生代滑脱面地层相交汇,结合赖晓玲等分析的壳幔过渡带结构特征^[15]。我们可以认为上述断续分布的壳内低阻层与滑脱面一起构成了研究区中上地壳的动力学边界条件,依托这些边界条件,祁连山碰撞造山带与走廊构造带表现为向北逆冲推覆,阿拉善地块向南俯冲的构造动力学特点。

通过本次大地电磁勘探,发现在清水河裂褶带内深部存在规模较大的高阻地块,尹秉喜等(2013)通过横跨宁南弧形构造带的剖面亦发现在清水河裂褶带内存在高阻块体^[16-17],闵刚统计的宁南弧形构造带区域中强地震分布图证明在中卫—同心断陷盆地内断续存在地震空白区^[3],另外,刘勇等(2010年)在对中卫北山金场子地区形成于燕山期晚侏罗世形成的闪长玢岩进行年龄测定时,捕获到了年龄较老的磨圆锆石,测定其年龄为(2434±34)Ma^[18],该较老年龄指示出在中卫—同心断陷盆地(清水河裂褶带)一带可能有元古宙老基底的存在。我们推断该高阻地块可能为发育在元古宙老基底上的早中生代或古生代“岛链式”古隆起。研究区中卫—同心断陷盆地及周缘侏罗纪和白垩纪沉积地层的缺失^[1],或者是在历史的长河中被剥蚀殆尽或者是因为隆起构造所致。

5 结 论

本研究依托横跨海原边界带、香山逆冲推覆构造及中卫北山区域的大地电磁勘探剖面,获得深

度为30 km的甘肃大沟—内蒙乱井二维电性结构剖面,通过多尺度电磁反演解释手段及地质地球物理综合解释,对电性结构剖面进行了高精度的构造地质解译,获得了一些新认识。研究区电性结构表现为高阻与低阻相间排列的“碎块状”特征;初步认为研究区中上地壳以深部断续分布的壳内低阻层及滑脱面地层为动力学边界条件,表现为祁连山碰撞造山带向北逆冲,阿拉善地块向下俯冲的动力学特征;摸清了1920年海原8.0级地震震源区的深部结构特征,震中投影点位于强电性梯度带且靠近高阻地块一侧,初步分析了海原8.0级大震的深部孕震构造及发震机理;对清水河裂褶带深部高阻地块进行了分析,初步认为该高阻地块为发育在元古宙老基底上的“岛链式”古隆起。

受限于本次重点解析剖面只有一条,很多认识还存在一定的局限性,下一步的工作重点将围绕宁南弧形构造区的多条大地电性剖面开展对比分析研究,加强地质成果总结,争取在宁南弧形构造中上地壳深部结构及变形机制的认识上有新的突破,同时也为本研究所总结的相关成果提供进一步的论证。

致谢:宁夏回族自治区地质调查研究院的张洁工程师与赵强主任在野外数据采集方面提供了很大帮助,成都理工大学的王绪本教授在后期资料解释中给出了宝贵的意见,在此一并表示感谢。

参考文献(References):

- [1] 汪一鹏. 有关塔波尼亚的青藏高原运动学模型的要点及评述[J]. 国际地震动态, 1998, 229: 9-14.
Wang Yipeng. Main points of the Kinematic model of the Qinghai-Xizang plateau developed BYP Tapponnier and review on the model[J]. Recent Developments in World Seismology, 1998, 229: 9-14(in Chinese with English abstract).
- [2] 潘裕生, 孔祥儒主编. 青藏高原岩石圈结构演化和动力学[M]. 广州: 广东科技出版社, 1998.
Pan Yusheng, Kong Xiangru. Evolution and Geodynamics of the lithospheric structure in the Qinghai-Xiang plateau[J]. Guangzhou: Guangdu Science and Technology Press, 1998(in Chinese with English abstract).
- [3] 闵刚. 宁南弧形构造带中上地壳电性结构及其构造涵义[D]. 成都理工大学博士论文, 2012.
Mingang. The electrical structure of middle&upper crust of Ningxia Arc-shaped Structural belt and its tectonic implications[D]. Chengdu University of Technology doctoral thesis,

- 2012(in Chinese with English abstract).
- [4] 詹艳, 赵国泽, 陈小斌, 等. 宁夏海原大震区西安州-韦州剖面大地电磁探测与研究[J]. 地球物理学报, 2004, 47(2): 274-281.
Zhanyan, Zhao Guozhe, Chen Xiaobin, et al. Crustal structure from magnetotelluric profiling in the Haiyuan earthquake area, Ningxia Hui Autonomous region, China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(2): 274-281(in Chinese with English abstract).
- [5] 张小军, 陶明信, 董新, 等. 北祁连地区新构造运动与成矿作用[J]. 西北地质, 2003, 25(3): 189-288.
Zhang Xiaojun, Tao Mingxin, Dong Xin, et al. Neotectonic movement and mineralization of the North Qilian area[J]. Northwestern Geology, 2003, 25(3): 189-288(in Chinese with English abstract).
- [6] 张韬, 林畅松, 丁孝忠, 等. 六盘山弧形构造带铜多金属矿床的成矿环境[J]. 地球学报, 2002, 23(6): 553-558.
Zhang Tao, Lin Changsong, Ding Xiaozhong, et al. Mineralization environments of the Cu polymetallic deposits in the Liupan Shan arc structure belt[J]. Acta geoscientia sinica, 2002, 23(6): 553-558 (in Chinese with English abstract).
- [7] 宋新华, 李红宇. 宁夏中卫市大铜沟铜矿地质特征及控矿因素浅析[J]. 矿产与地质, 2009, 23(2): 118-123.
Song Xinhua, Li Hongyu. Geological characteristics and ore-controlling factors of the Datonggou copper deposit in Zhongwei City of Ningxia[J]. Mineral Resources and Geology, 2009, 23(2): 118-123(in Chinese with English abstract).
- [8] 刘树文, 杨朋涛, 李秋根, 等. 秦岭中段印支期花岗岩岩浆作用与造山过程[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2011, 41(6): 1929-1940.
Liu Shuwen, Yang Pengtao, Li Qiugen, et al. Indosinian granitoids and orogenic processes in the middle segment of the Qinling orogen, China[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2011, 41(6): 1929-1940(in Chinese with English abstract).
- [9] 詹艳, 赵国泽, 王继军, 等. 青藏高原东北缘海原弧形构造区地壳电性结构探测研究[J]. 地震学报, 2005, 27(4): 431-440.
Zhan Yan, Zhao Guoze, Wang Jijun, et al. Crustal electric structure of Haiyuan arcuate tectonic region in the northeastern margin of Qinghai-Xizang plateau, China. Acta Seismologica Sinica, 2005, 27(4): 431-440(in Chinese with English abstract).
- [10] 赵国泽, 汤吉, 詹艳, 等. 青藏高原东北缘地壳电性结构和地块变形关系的研究[J]. 中国科学(D辑), 2004, 34(10): 908-918.
Zhao Guoze, Tang Ji, Zhan Yan, et al. Crust electrical structure and block deformation relationship in the northeastern margin of Qinghai-Xizang plateau, China[J]. Science in China (Ser. D), 2004, 34(10): 908-918(in Chinese with English abstract).
- [11] 尹秉喜, 程建华, 闵刚, 等. 南南弧形构造带甘肃靖远-宁夏盐池剖面中上地壳电性结构特征[J]. 地学前缘, 2013, 20(4): 332-339.
Yin Bingxi, Cheng Jianhua, Min Gang, et al. The conductivity characteristics of middle & upper crust of Jingyuan-Yanchi, Southern-Ningxia arc structure[J]. Earth Science Frontiers, 2013, 20(4): 332-339(in Chinese with English abstract).
- [12] 张进, 马宗晋, 任文军, 等. 宁夏中南部古生代弧形构造[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(1): 29-37.
Zhang Jin, Ma Zongjin, Ren Wenjun, et al. Paleozoic arcuate thrust belt in central and southern Ningxia[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2004, 28(1): 29-37(in Chinese with English abstract).
- [13] 汤锡元, 郭忠铭, 陈荷立, 等. 陕甘宁盆地西缘逆冲推覆构造与油气勘探[M]. 西安: 西北大学出版社, 1992.
Tang Xiyuan, Guo Zhongming, Chen Heli, et al. Overthrust structure and oil and gas exploration of the western margin of the Ordos Basin[M]. Xi'an: Northwestern University Press, 1992(in Chinese).
- [14] 王家映. 石油电法勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
Wang Jiaying. Oil and Electrical Prospecting[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992(in Chinese with English abstract).
- [15] 赖晓玲, 张先康, 方盛明. 青藏高原东北缘壳幔过渡带研究[J]. 地震学报, 2004, 26(2): 134-139.
Lai Xiaoling, Zhang Xiankang, Fang Shengming. Study of crust-mantle transitional zone along the northeast margin of Qinghai-Xizang plateau[J]. Acta Seismologica Sinica, 2003, 26(2): 134-139(in Chinese with English abstract).
- [16] 张珂, 刘开瑜, 吴加敏, 等. 宁夏中卫盆地的沉积特征及其所反映的新构造运动[J]. 沉积学报, 2004, 22(3): 465-472.
Zhang KE, Liu Kaiyu, Wu Jiamin, et al. Depositional Features of the Zhongwei Basin, Ningxia, and its implications of neotectonic movements[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(3): 465-472(in Chinese with English abstract).
- [17] 李朋武, 张世红, 高锐, 等. 内蒙古中部晚石炭纪-早二叠世古地磁数据及其地质意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(1): 424-432.
Li Pengwu, Zhang Shihong, Gao Rui, et al. New upper Carboniferous-lower Permian paleomagnetic results from the central Inner Mongolia and their geological implications[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2012, 42(1): 424-432(in Chinese with English abstract).
- [18] 刘勇, 李廷栋, 王彦斌, 等. 宁夏卫宁北山金场子闪长玢岩岩脉地质特征及 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄[J]. 中国地质, 2010, 37(6): 1576-1583.
Liu Yong, Li Tingdong, Wang Yanbin, et al. Geological characteristics and zircon SHRIMP U-Pb data of Jinchangzi dioritic porphyrite dykes in Zhongwei City, Ningxia[J]. Geology in China, 2010, 37(6): 1576-1583(in Chinese with English abstract).

The conductivity characteristics of Dagou–Luanjing middle and upper crust in Southern Ningxia arc structure

MIN Gang^{1,2,3}, CHENG Jian–hua¹, YIN Bing–xi⁴, CAI Xue–lin³, XIA Shi–bin³

(1. *Ningxia Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Yinchuan, 750021, Ningxia, China;*

2. *China University of Geosciences (Beijing), Beijing, 100083, China;* 3. *Key Laboratory of Earth Exploration and Information Technology of MOE, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;*

4. *Geological Survey of Ningxia, Yinchuan 750021, Ningxia, China)*

Abstract: In order to study the conductivity characteristics of Dagou–Luanjing middle and upper crust, the authors carried out magnetotelluric sounding work in the study area, and obtained the electrical structure model by the two–dimensional inversion method, which clearly reveals the typical electrical structure of Dagou–Luanjing: (1) The middle and upper crust shows the "chunky" structural style totally, and the authors infer that the conductivity of the corridor structure belt is relatively lower whereas the conductivity of the Qilian orogenic belt is relatively higher; (2) The low–resistivity zone caused by focal fracture of Haiyuan earthquake is neither steep like the strike–slip fault nor gentle like the thrust belt, but has both strike–slip and thrust characteristics; (3) The low–impedance and high–conductivity layers in the mid–upper crust of the study area intermittently exist, and show the structural style of deeper in the south and shallower in the north; it can also be inferred that these low–impedance and high–conductivity layers always reach their termination at the edge of the high impedance plots, or intersect the detachment layer under the thrust nappes; (4) A high resistance block exists in Qingshui River depression basin, which is likely to be an "island chain" paleouplift that was developed on the basin basement in Late Paleozoic and Early Mesozoic period, thus providing evidence for the tectonic movement of Yanshanian.

Key words: Southern Ningxia arc structure; MT method; electrical structure; shell low resistance layer; palaeohigh; detachment layer

About the first author: MIN Gang, male, born in 1983, lecturer, doctor, engages in the study of geophysical inversion and structural geology; E–mail: mg-s1983827@163.com.