

文章编号: 1006-6616 (2016) 04-0943-12

重磁电综合地球物理探测 河套盆地深部结构

刘 嵘¹, 马见青¹, 李庆春¹, 叶培盛²

(1. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054;

2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

摘 要: 从地球物理的角度出发, 利用重力、磁法及电法勘探对河套盆地第四系深覆盖区展开深入研究, 对河套断陷带南北边界断裂——鄂尔多斯北界断裂、色尔腾山前断裂的性质, 河套盆地第四纪沉积物特征及厚度, 河套沉积基底构造的探测进行了大量研究工作, 并利用电法剖面对该区第四纪含水层分布规律进行了初步研究。通过重磁联合反演、天然地震数据, 分析并推断了研究区由南向北的4条隐伏断层 F_1 — F_4 及狼山—色尔腾山前大断裂 F_5 , 同时揭露了该区结晶基底的起伏及埋深, 研究区南部基底深度 2.5~4.2 km, 北部中心基底最大埋深可达 6 km, 北部色尔腾山前断裂带迅速升至 0~1 km。

关键词: 河套盆地; 磁法勘探; 重力勘探; 超高密度电法; 结晶基底; 隐伏断层

中图分类号: P631

文献标识码: A

1 研究区概况

河套盆地位于华北克拉通的北缘, 夹于阴山造山带与鄂尔多斯盆地之间, 为一个近东西向的狭长型新生代断陷盆地^[1] (见图1)。前人研究认为, 在阴山造山带造山过程中, 主要是以结晶基底为受力边界层, 并控制着上覆沉积盖层的构造变形^[2-3]。河套盆地及其邻近地域的构造类型众多且复杂多样, 既存在稳定的克拉通与油气沉积盆地, 又包括活动的造山带。金属、非金属矿产资源与油、气、煤等能源在该区蕴藏丰富^[4-6]。因此厘定该盆地的沉积建造和结晶基底的起伏结构, 对于研究盆地的形成与演化、研究资源的分布都具有重要的理论意义和实际价值。我国近年来针对鄂尔多斯盆地与华北克拉通地域的深部壳、幔结构与其形成的动力学过程开展了大量的地质与地球物理工作^[7-11], 并取得了大量有意义的成果, 但针对河套盆地地域的研究却不多见。

收稿日期: 2016-09-16

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“特殊地质地貌区填图试点”(DD20160060); 国家自然科学基金项目(41374145); 中国地质调查局特殊景观区填图试点项目(12120114042101); 长安大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G1261060)

作者简介: 刘嵘(1992-), 男, 硕士研究生, 地球探测与信息技术专业。E-mail: liurong0918@126.com

通讯作者: 马见青(1984-), 男, 博士, 讲师。主要从事地震信号多尺度处理, 地调、地质填图综合地球物理处理与解释的教学与研究。E-mail: majianqing1984@126.com

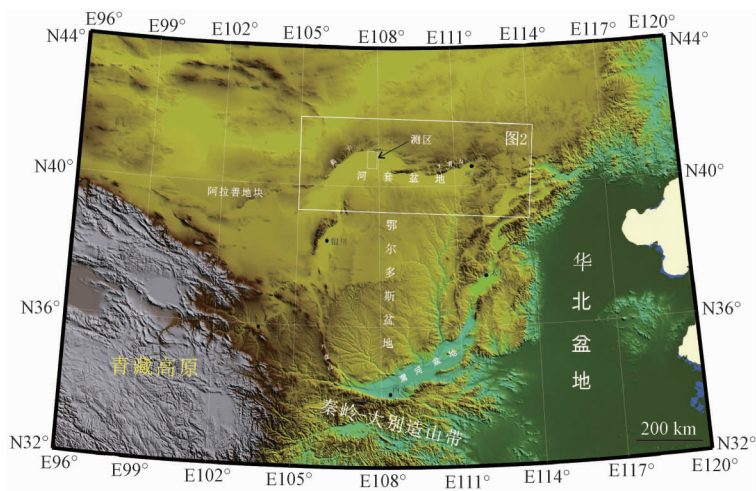


图 1 河套盆地及邻区构造纲要图

Fig. 1 Structure outline of Hetao Basin and adjacent area

河套盆地西界为狼山山前断裂，东界为和林格尔断陷，北界为色尔腾山、乌位山和大青山山前断裂，南界为鄂尔多斯北缘断裂，盆地总体走向近东西，长约 400 km，宽 40 ~ 80 km，是鄂尔多斯块体周缘规模最大、垂直差异活动最强烈的断陷带^[12]。由于受到北侧蒙古古生代板块的南向挤压、南侧鄂尔多斯陆块和山西陆块的阻挡以及鄂尔多斯盆地稳定陆块的左旋运动^[13-14]，导致在该断陷盆地的周边时有地震发生。基于已有对鄂尔多斯陆块北缘主要活动断裂分布和晚第四纪强震复发特征的研究，推测河套盆地未来最可能发生强震的地区之一^[4]。

对河套断陷带南北边界断裂——鄂尔多斯北界断裂、色尔腾山前断裂的性质，河套盆地第四纪沉积物特征、厚度及沉积相变化，河套沉积基底构造的探测，是本次地球物理工作的重点，同时开展第四纪含水层分布规律的探测，目的是为区调填图地层单元的建立、关键地质问题的解决提供地球物理解释。本文利用河套盆地南北向的重磁电综合剖面研究了该区的结晶基底起伏及断裂分布，为进一步深化研究该区的构造特征提供有力依据。

2 地球物理特征

研究区位于内蒙古呼勒斯太苏木（K48E017024）、塔尔湖镇（K48E018024）、复兴城（K48E019024）、吉尔嘎朗图乡（K48E020024）4 幅 1:50000 图幅内，工作区地理坐标范围：东经 107°45′—108°00′，北纬 40°40′—41°20′，总面积 1510 km²（见图 2）。

2.1 岩石电性特征

本次勘查目的层主要为河套盆地第四系及其基底地层。一般情况下，如果不考虑地下水矿化度以及地下温度的影响，潜水面以下第四系不同堆积物中，粗砂、砂砾石电阻率相对为高值，中、细砂电阻率稍低，黏土的电阻率最低，电性（收集）特征变化见表 1。

在勘查区内，地下水矿化度差异较大，是影响电阻率变化的主要因素。结合在同类地区勘查的经验，测区电阻率随地层岩性和地下水矿化度（收集）变化特征见表 2。

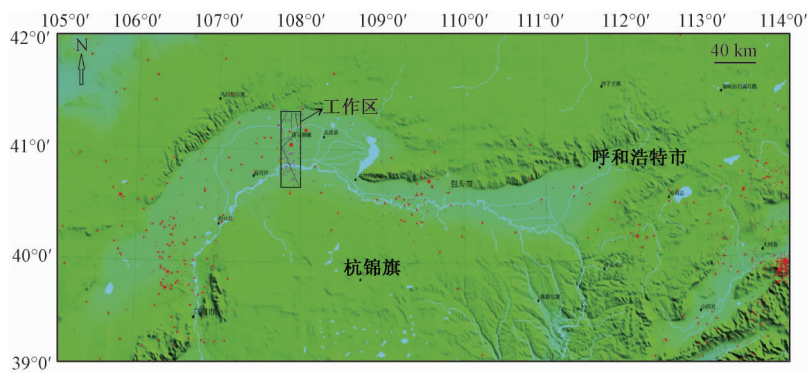


图 2 河套盆地研究区概况图

Fig. 2 DEM of the Hetao Basin and location of the study area

表 1 河套盆地第四系不同堆积物电阻率统计

Table 1 Resistivity statistics of different Quaternary deposits in the Hetao Basin	
岩性	电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)
粗砂、砂砾石	> 50
中砂	30 ~ 40
细砂	20 ~ 30
黏土	< 20

表 2 河套盆地潜水面以下第四系不同堆积物电阻率及地下水矿化度特征

Table 2 Characteristics of resistivity of Quaternary deposits below water table and groundwater salinity in the Hetao Basin		
地层岩性	电阻率/($\Omega \cdot \text{m}$)	地下水矿化度/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$)
粗砂、砂砾石	> 15	< 3
中粗砂	10 ~ 15	2 ~ 3
中细砂	7 ~ 10	3 ~ 5
细砂、黏土	< 7	> 3

2.2 岩石磁化率特征

前人对阴山造山带地区采集标本并测定了磁化率^[15], 可作为测区岩石磁性参数变化的依据 (见表 3)。

表 3 鄂尔多斯—阴山一带岩石磁化率参数^[15]

Table 3 Rock magnetic susceptibility parameters in the Erdos-Yinshan area				
时代	阴山造山带		鄂尔多斯盆地	
	岩性	磁化率/(10^{-5} SI)	岩性	磁化率/(10^{-5} SI)
太古代	片麻岩、混合岩及变粒岩	30 ~ 10000	片麻岩及变粒岩、基性火山岩	1800 ~ 5000
下元古代	大理岩、板岩及石英砂岩	10 ~ 50	花岗岩、混合岩、大理岩	20
中上元古代	板岩	10 ~ 40	浅变质岩	1 ~ 9
	石英粉砂岩	20 ~ 3000		
古生代	凝灰岩	10 ~ 30	碳酸盐岩、陆相碎屑岩	< 20
	砂岩	40 ~ 100		
中生代	砾岩、泥岩、砂岩	200 ~ 500	粗碎屑岩	1 ~ 9
	基性火山岩	1500 ~ 3000	泥岩、粉砂岩	10 ~ 30
新生代	黏土岩	50	风积沙土	50
	含砾细沙、泥岩	200 ~ 800		

2.3 密度特征

收集了内蒙古地区主要岩石密度（样本 34 个，大小 30 mm × 60 mm），其中板岩密度 2.9 g/cm³，闪长岩密度在 2.7 g/cm³ 以上；砂岩密度在 2.6 g/cm³ 左右，部分粉砂岩密度达到了 2.87 g/cm³；黑云母二长花岗岩的密度与砂岩的相近，在 2.6 ~ 2.7 g/cm³ 之间变化。

河套盆地地区新第三系和第四系密度 2.0 ~ 2.1 g/cm³，侏罗—白垩纪地层密度 2.40 ~ 2.66 g/cm³，乌拉山群高磁性基底密度 2.30 ~ 2.55 g/cm³，基底和其上覆地层之间有明显的密度界面^[16]。在老地层出露或基底埋藏较浅的地区，产生高重力异常；相反地，老地层埋藏深的地方，出现局部重力低异常。

综上分析，通过高精度重力、磁法测量可以揭示测区内深部基底构造特征及断裂构造分布情况；利用超高密度电法和音频大地电磁测深，可对河套地区的地下含水层、浅层第四纪冲洪积物厚度和分层等进行探测和研究。

3 重、磁、电综合地球物理勘探

1:25000 高精度重力剖面近南北贯穿工作区，点距 100 m，剖面长度 91.5 km；1:10000 高精度磁法剖面近南北贯穿工作区，与重力剖面重合，点距 40 m，剖面长度 110 km；测线分布详情见图 2。超高密度电法剖面每个排列 64 根电极，电极距 10 m，分 31 个排列布设在重磁剖面的局部地段，累计长度 19.45 km。

3.1 重力勘探

南北穿过测区的实测布格重力异常剖面见图 3，幅值变化约 $100 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ ，中部相对平缓，南侧异常值上升，北侧出现较强的梯度变化带，说明这里山前断裂发育，且为沉积基底的最厚处。

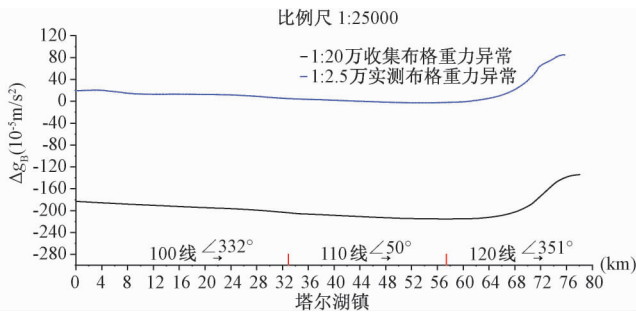


图 3 100-110-120 测线实测布格重力异常 (Δg) 与区域重力对比剖面

Fig. 3 The measured Bouguer gravity anomaly (Δg) compared with regional gravity anomaly in line 100-110-120

河套盆地地形起伏变化于 1000 ~ 1150 m 之间，地势极为平缓；在河套盆地北部的阴山造山带地域地形高程又逐渐提升。根据经典的地壳均衡假说，布格重力异常与地势一般呈现反相关的“镜像”关系，即地势越高，布格重力异常值越低。但在河套盆地，其布格重力异常与地势的分布却呈现一种近似“同步变化”的特征，这是由于盆地内部巨厚低密度沉积物质填充所致。进入测区后布格重力值开始缓慢下降，并且在 41°09′（测点 55 km）左右降至最低值，然后在约 41°16′（测点 80 km）左右开始迅速提升，直至出测区都维持高布格异常值。

图 4 所示的 130 线布格重力异常也显示类似的特征, 在约 10 km 的水平距离内, 异常变化达 $80 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$, 说明山前断裂产状较陡。

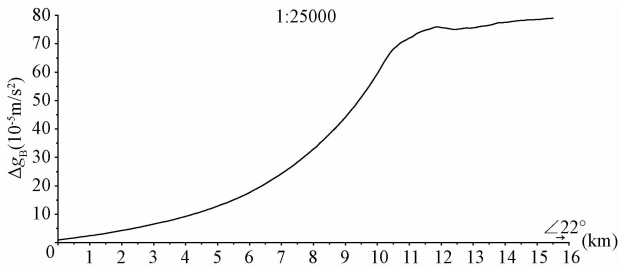


图 4 130 测线实测布格重力异常 (Δg) 剖面图
Fig. 4 Measured Bouguer gravity anomaly profile of profile 130

3.2 磁法勘探

根据收集的资料, 河套盆地内新生界主要以风积砂土为主, 磁性极弱。盆地结晶基底为强磁性, 与上覆沉积地层之间有明显的磁性差异, 是区内磁场出现正异常区或异常带的主要原因。

图 5 是近南北贯穿测区的 1:10000 实测磁异常与 1:200000 航磁异常剖面对比图^[17~18], 二者具有较好的一致性, 但实测异常局部变化更明显, 精度更高。由于河套盆地大部分都被较厚的新生代沉积地层覆盖^[19~20], 沉积层弱磁性对磁异常贡献则很小, 磁异常主要来自于结晶基底的岩石。

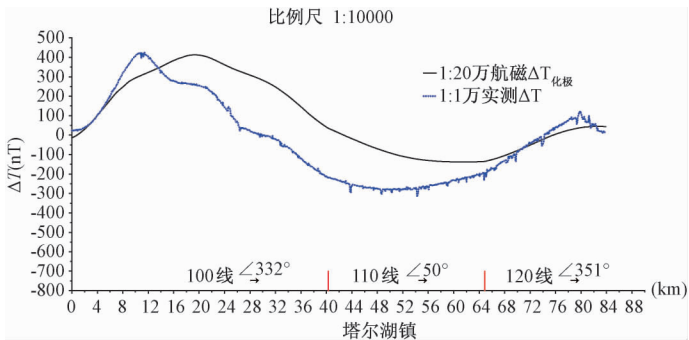


图 5 100-110-120 测线实测磁异常 (ΔT) 与航磁异常对比剖面图
Fig. 5 Measured magnetic anomalies (ΔT) and aeromagnetic anomaly profile of profile 100-110-120

3.3 高密度电法

超高密度电法数据采集过程中使用多通道数据采集方式, 充分利用已经布好的电极, 除供电电极以外其他电极均可以进行数据采集, 在此过程中缩短了因为进行单一数据采集而消耗的时间, 并且增大了数据采集量, 从而提高了工作效率^[21]。超高密度电法一次数据采集量很大, 保证了数据处理的可靠性。45-44 号排列位于测区中部, 为北东方位, 起点坐标 ($107^{\circ}51'E$, $41^{\circ}05'N$)。在 610 ~ 920 m 段反演显示明显的低-高-低三层结构; 在 550 ~ 570 m 间, 推测有断层存在, 两侧电阻率有明显变化; 地层分布呈水平层状 (见图 6)。整条断面电阻率低于 $100 \Omega \cdot \text{m}$, 剖面南侧 0 ~ 550 m 测点之间电阻率低于 $40 \Omega \cdot \text{m}$ 。L100 线断面位于测区南部黄河沿岸, 排列为北北西方位, 起点坐标 ($107^{\circ}12'E$, $40^{\circ}47'N$), 断面长 1821 m。525 ~ 1100 m 间电阻率最低, 电阻率低于 $5 \Omega \cdot \text{m}$ (见图 7)。南、北两端地电分布呈现高-低-

高的结构特征，但电阻率差异并不明显。推测地层呈水平层状，富含地下水且有一定矿化度。110 线断面位于测区中部西侧，排列为北东方位，起点坐标（107°45'E，41°01'N）。0~570 m 间电阻率断面呈现高-低二层结构，浅地表电阻率稍高，为 25~38 Ω·m，下伏地层含水量大，电阻率 10~20 Ω·m；570~940 m 间电阻率断面表现为低-高二层结构，浅地表电阻率较低，电阻率低于 5 Ω·m，地层含水量大，下伏地层电阻率 8~10 Ω·m，上下两层电阻率差异不大（见图 8）。

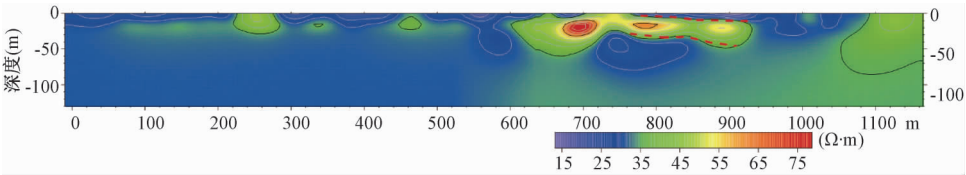


图 6 排列 45-44 超高密度反演断面

Fig. 6 Ultra high density inversion section in arrangement of 45-44

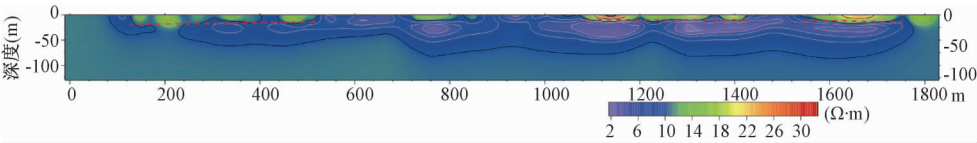


图 7 100 断面 33-36 排列超高密度反演断面

Fig. 7 Super high density inversion in section 33-36 of the 100 cross section

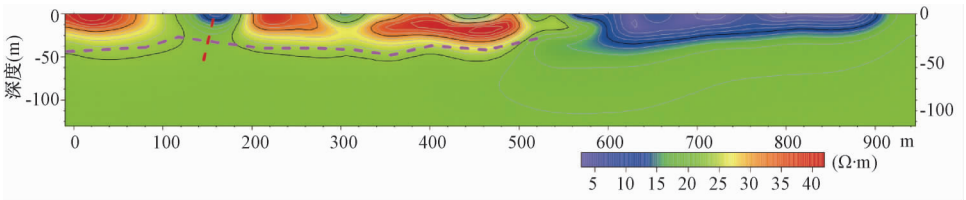


图 8 110 断面 37-100 排列超高密度反演断面

Fig. 8 Super high density inversion section in arrangement 37-100 of 110 section

三条反演断面电阻率均很低，这主要与地层含水率高有关，且有一定的矿化度。电性分层明显，说明盆地地层近似水平。

3.4 单点音频大地电磁（AMT）测深

110 线 AMT 测深点位于测区中部黄河以北附近，110 号点 AMT 电阻率反演结果如图 9 所示。电阻率模型表现为高、低互层，地表电阻率较低，随深度加大逐渐升高；在 1000 m 深度范围内电阻率分层明显，电阻率值低于 10 Ω·m。由 XY 和 YX 两个模式观测结果反演电阻率分布可以看出，测点下方电阻率分布表现出较好的横向各向同性，电阻率很低，说明沉积环境稳定。

4 盆地深部模型

4.1 重磁剖面联合反演及结果分析

采用中国地质调查局 RGIS2012 软件进行 2.5D 重磁联合反演，得到重磁反演拟合曲线

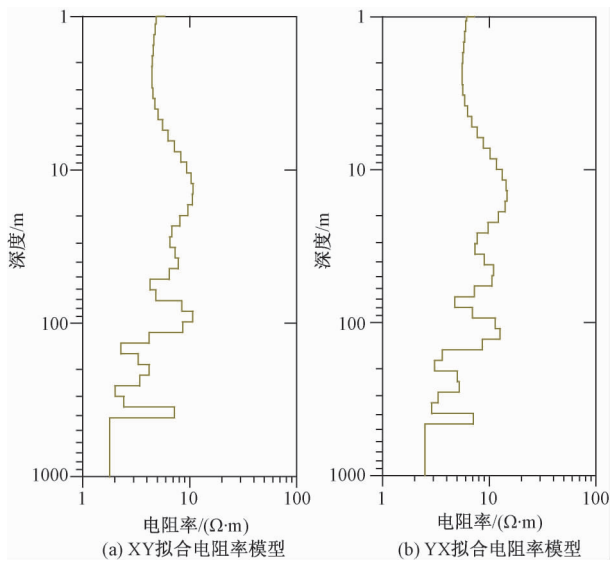


图 9 110 线 110 号点 AMT 电阻率反演图

Fig. 9 AMT resistivity inversion model from point 110 in line 110

(见图 10), 并结合了该区 DEM 图与天然地震, 得到该区综合结构模型 (见图 11)。

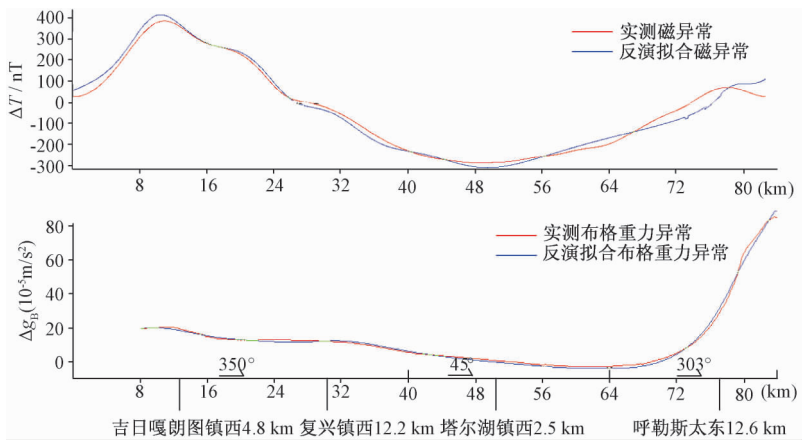


图 10 重磁反演拟合曲线

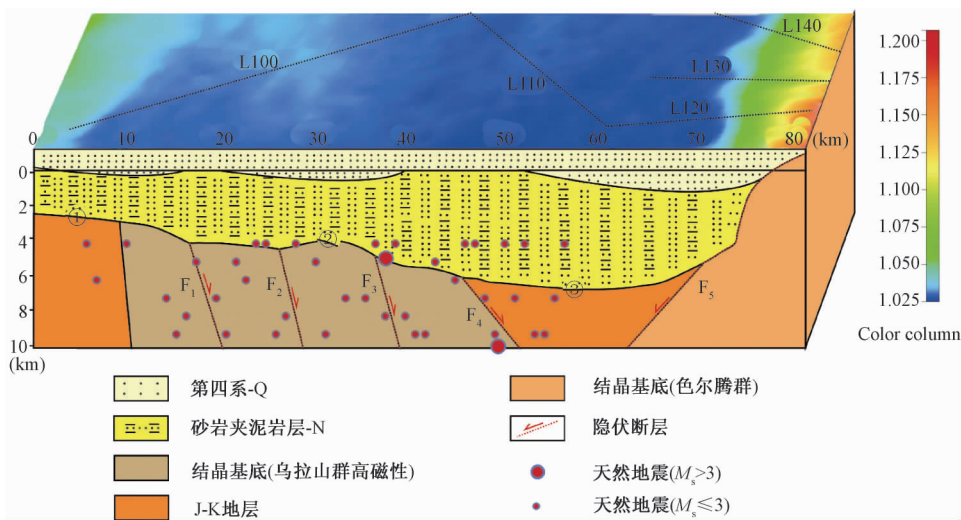
Fig. 10 Fitting curves of gravity and magnetic inversion

4. 1. 1 推断基底界面特征及断裂

4. 1. 1. 1 由布格重力异常推断基底界面特征

重力异常控制因素比较复杂, 它受基底和盖层乃至深部莫霍面等因素的综合影响。河套盆地沉积盖层广泛发育, 层内密度横向差别不大, 层间密度差异明显的主要是盖层与下伏基底, 加之剖面长度有限, 因而将剖面上的重力异常变化主要归结为结晶基底的起伏, 兼有沉积盖层不同类岩性界面的局部影响。

由反演结果看, 测区南端基底变化不大, 沉积厚度在 2.5 ~ 4.2 km 之间, 沉积厚度自南向北增大, 基底界面有明显的起伏变化, 最大厚度沿山前断裂分布, 达 6 km。巨厚的低密度沉积建造使之在地表观测到明显的低布格重力异常, 这也是造成布格重力异常与地形高程



1—鄂尔多斯台坳斜坡；②—基底隆升；③—乌加河凹陷；F₁—F₄—河套新断层；F₅—狼山南缘断层（色尔腾山前断裂）

图 11 河套覆盖区深部模型

Fig. 11 The deep model of the covered area in Hetao Basin

呈特异的同步变化的主要原因。结晶基底在色尔腾山前断裂处已出露，野外地质调查可见明显的基底露头。高密度基底沿色尔腾山前断裂升至地表导致该处平均密度值增大，在地表观测到显著的呈上升趋势的高布格重力异常。根据反演结果，沉积厚度最大的地区其基底以下地层平均密度要略高于南侧基底密度。

4.1.1.2 由磁异常推断基底界面特征

测区南端磁异常在 0 nT 附近，而后迅速上升至 600 nT 左右。从反演过程来看，如果盆地下方岩石磁性均匀一致的话，单纯的基底起伏是难以引起如此大的磁场变化的，况且重力并未发现显著的基底上隆。航磁异常显示在该处也为明显的东西向条带状磁异常高值区，前人推测为山体属推挤造山机制，山体不断抬升，其深部软流层上凸，地幔底辟活动，而地幔物质和岩浆则沿块体边界以断裂为通道上涌，形成高磁性的岩体物质，导致高梯度变化的正异常带出现。故剖面南部达 600 nT 的高正磁异常应该是由强磁性乌拉山群岩体引起。测区北端基岩出露区磁异常也为高值区，剖面中部和北部磁异常宽缓起伏推测是由高磁性基底局部起伏引起（与重力反演结果吻合）。

4.1.2 隐伏断层推断

在断裂构造作用下，地质上会产生各种构造现象。深大断裂可以控制其两侧的构造活动，使岩层被错断或发生裂开，相互错断的断裂破坏了原构造的连续性，形成不同的构造格局。发生断裂的同时往往伴随有岩浆活动，这样就形成密度与磁性上的横向差异，这种横向差异在重、磁力异常上必然有所表现，具备了利用重、磁异常确定断裂构造的地球物理前提，因而可根据重、磁异常特征来推断断裂。结合 1:200000 内蒙古区域地质调查（临河幅）及区域重磁资料，综合推断出 5 条断裂：

F₁：鄂尔多斯台坳北缘推测断裂，大致位于吉日嘎郎图镇北侧（纬度 40°48′）。在该断裂附近重、磁异常都一致显著下降。该断裂或与高磁性结晶基底的局部界面起伏有关。结合以往相邻测区地震资料与测区航磁资料推测，该断裂走向近东西，倾向北，倾角约 60°。

F_2 : 复兴断裂 (景阳林推测断层), 大致位于复兴镇南侧 (纬度 $40^{\circ}55'$)。在该断裂附近磁异常起伏变化明显, 推测该断裂或与高磁性结晶基底的局部界面起伏有关。结合地震及地质资料推测, 该断裂走向近北西, 倾向北, 倾角约 70° 。

F_3 : 复兴断裂 (孙家圪旦推测断层), 大致位于复兴镇北侧 (纬度 $40^{\circ}58'$)。该断裂附近磁异常由正异常变为负异常, 有明显下降趋势, 布格重力异常也有下降趋势, 与 F_1 、 F_2 一样与高磁性结晶基底的局部界面起伏有关。 F_2 、 F_3 之间基底隆起导致局部微弱重力高。结合地震及地质资料推测, F_3 走向东西, 倾向北, 倾角约 70° 。 F_2 、 F_3 统称为复兴断裂。

F_4 : 即五原断裂 (临河凹陷南缘推测断裂), 大致位于塔尔湖镇南侧 (纬度 $41^{\circ}00'$)。该断裂附近重磁异常均呈明显下降趋势, 直至降到最低值。推测该断裂面亦是一个岩性分界面, 断裂南侧岩体磁性高 (乌拉山群), 北侧岩体磁性低 (色尔腾山结晶基底)。该断裂北侧即为沉积构造最厚的地区。结合地质及地震资料推测, 该断裂近东西走向, 倾向北, 倾角约 45° 。

F_5 : 即狼山—色尔腾山前断裂, 是位于河套盆地北界的一条深大断裂。沿该断裂以北基底迅速升至地表, 导致磁异常和布格重力异常都随之迅速增大至局部高值。该断裂在 $1 \sim 3$ km 深度产状陡, 浅部及深部倾角减小, 呈上陡下缓铲型, 结合地质资料, 该断裂走向东西, 倾角 $40^{\circ}—60^{\circ}$, 倾向南。

4.2 天然地震

天然地震是地壳运动最直观的表现之一, 也是地下构造活动鲜明的标志。本次共收集了研究区 63 个天然地震事件, 时间范围自 1971 至 2016, 其中 $M_s > 3$ 级的地震有 10 个^[22] (见表 4), 其目的是为了对隐伏断层的推论提供依据。通过对天然地震数据的投影, 可以清晰观测到在上文推测的隐伏断层周围均出现地震密集现象。但是狼山南缘断层附近未见有天然地震聚集, 断层活动时间早于 1971 年。

表 4 天然地震事件
Table 4 Earthquake events

日期	纬度	经度	深度/km	震级 (M_s)
1971/5/7	41°00'00"	108°00'00"	20	4.0
1979/9/28	41°12'00"	108°00'00"	15	3.2
2001/12/17	41°09'36"	107°51'36"	15	3.1
2002/12/4	40°57'54"	107°52'19"	33	4.7
2005/2/27	40°53'60"	107°45'00"	11	4.5
2005/2/27	40°44'17"	107°54'32"	10	4.0
2005/2/27	40°52'48"	107°49'12"	20	3.6
2005/3/25	41°00'00"	107°47'60"	15	3.6
2005/3/25	40°51'00"	107°49'12"	5	3.3
2006/6/5	41°17'60"	107°47'60"	12	4.8

注: 天然地震数据来自 <http://data.earthquake.cn/data/index.jsp>

5 结论

重磁联合反演表明, 测区基底埋深普遍超过 2000 m, 北端盆地中心基底埋深达 7000 m。结合以往相邻测区地震资料与测区航磁资料推测出 5 条断裂 ($F_1—F_5$), F_1 走向近东西, 倾向北, 倾角约 60° ; F_2 走向近北西, 倾向北, 倾角约 70° ; F_3 走向东西, 倾向北, 倾角约

70°; F_4 走向北西, 倾向北, 倾角约 45°; F_5 (即色尔腾山前断裂) 走向东西, 倾角 40°—60°, 倾向南。

河套盆地北缘色尔腾山前断裂带在重、磁、超高密度电法剖面上均有异常反应。该异常区随着基底抬升, 布格重力异常向北呈增大趋势, 梯度变化明显。断裂带两侧的电阻率差异明显, 电性分界面向南倾斜, 且山前断裂附近冲洪积扇沉积分层结构明显。

超高密度电法和音频大地电磁测深结果表明, 河套盆地地下覆沉积地层的电阻率很低, 电性分层明显, 电阻率分布表现出较好的横向各向同性, 这些都与地层含水率高有关, 且有一定的矿化度。同时说明河套盆地地层近似水平, 沉积环境稳定。

参 考 文 献

- [1] 张永谦, 滕吉文, 王谦身, 等. 河套盆地及其邻近地域的地壳结构与深层动力学过程 [J]. 地球物理学进展, 2013, 28 (5): 2264 ~ 2272.
ZHANG Yong-qian, TENG Ji-wen, Wang Qian-shen, et al. Crustal structure and the geodynamic process beneath the Hetao basin and adjacent area [J]. Progress in Geophysics, 2013, 28 (5): 2264 ~ 2272.
- [2] 赵重远, 郭忠铭, 惠斌耀. 河套弧形构造体系及其形成和演化机制 [J]. 石油与天然气地质, 1984, 5 (4): 350 ~ 361.
ZHAO Zhong-yuan, GUO Zhong-ming, HUI Bin-yao. Hetao arcuate tectonic system and its their mechanism of formation and evolution [J]. Oil and Gas Geology, 1984, 5 (4): 350 ~ 361.
- [3] 陈志勇. 内蒙古色尔腾山的推覆构造 [J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 2000, 25 (3): 237 ~ 241.
CHEN Zhi-yong. Nappe structure in Mount Seerteng, Inner Mongolia [J]. Earth Science: Journal of China University of Geosciences, 2000, 25 (3): 237 ~ 241.
- [4] 冉永康, 陈立春, 杨晓萍, 等. 鄂尔多斯北缘主要活动断裂晚第四纪强震复发特征 [J]. 中国科学 (D 辑), 2003, 33 (增刊): 135 ~ 143.
RAN Yong-kang, CHEN Li-chun, YANG Xiao-ping, et al. Late Quaternary strong earthquake recurrence characteristics of the main active faults in the northern margin of the Ordos Basin [J]. Chinese Science (Series D), 2003, 33 (Suppl.): 135 ~ 143.
- [5] 邓起东, 程绍平, 闵伟, 等. 鄂尔多斯块体新生代构造活动和动力学的讨论 [J]. 地质力学学报, 1999, 5 (3): 13 ~ 22.
DENG Qi-dong, CHENG Shao-ping, MIN Wei, et al. Discussion on the Cenozoic tectonic activities and dynamics of Ordos block [J]. Journal of Geomechanics, 1999, 5 (3): 22 ~ 13.
- [6] 张岳桥, 施炜, 廖昌珍, 等. 鄂尔多斯盆地周边断裂运动学分析与晚中生代构造应力体制转换 [J]. 地质学报, 2006, 80 (5): 639 ~ 647.
ZHANG Yue-qiao, SHI Wei, LIAO Chang-zhen, et al. Fault kinematic analysis and change in Late Mesozoic tectonic stress regimes in the peripheral zones of the Ordos Basin, north China [J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80 (5): 639 ~ 647.
- [7] 赵俊峰, 刘池洋, 喻林, 等. 鄂尔多斯盆地中生代沉积和堆积中心迁移及其地质意义 [J]. 地质学报, 2008, 82 (4): 540 ~ 552.
ZHAO Jun-feng, LIU Chi-yang, Yu Lin, et al. The transfer of depocenters and accumulation centers of Ordos Basin in Mesozoic and its meaning [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82 (4): 540 ~ 552.
- [8] 滕吉文, 王夫运, 赵文智, 等. 鄂尔多斯盆地上地壳速度分布与沉积建造和结晶基底起伏的构造研究 [J]. 地球物理学报, 2008, 51 (6): 1753 ~ 1766.
TENG Ji-wen, WANG Fu-yun, ZHAO Wen-zhi, et al. Velocity distribution of upper crust, undulation of sedimentary formation and crystalline basement beneath the Ordos basin in north China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2008, 51 (6): 1753 ~ 1766.
- [9] 张永谦, 滕吉文, 王夫运, 等. 阴山造山带及鄂尔多斯盆地北部地区上地壳的地震波属性结构及岩性推断 [J].

地球物理学报, 2011, 54 (1): 87~97.

ZHANG Yong-Qian, TENG Ji-wen, WANG Fu-yun, et al. Structure of the seismic wave property and lithology deduction of the upper crust beneath the Yinshan orogenic belt and the northern Ordos block [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54 (1): 87~97.

- [10] 滕吉文, 王夫运, 赵文智, 等. 阴山造山带—鄂尔多斯盆地岩石圈层、块速度结构与深层动力过程 [J]. 地球物理学报, 2010, 53 (1): 67~85.

TENG Ji-wen, WANG Fu-yun, ZHAO Wen-zhi, et al. Velocity structure of layered block and deep dynamic process in the lithosphere beneath the Yinshan orogenic belt and Ordos Basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53 (1): 67~85.

- [11] 内蒙古自治区地质局. 中国人民共和国区域地质调查报告 (地质部分): 乌拉特后旗幅、临河县幅 [R]. 呼和浩特: 内蒙古自治区地质局, 1982.

Geological Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region. Regional geological survey report of the People's Republic of China (Geology): Wulatehouqi amplitude, Linhe County [M]. Hohhot: Geological Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region, 1982.

- [12] 袁晓灵. 河套盆地 $M_s \geq 5.5$ 级地震前地震活动性特征 [J]. 华北地震科学, 2001, 19 (2): 27~34.

YUAN Xiao-ling. Character of seismicity before the $M_s \geq 5.5$ earthquakes in Hetao Basin [J]. North China Earthquake Science, 2001, 19 (2): 27~34.

- [13] 吴福元, 葛文春, 孙德有, 等. 中国东部岩石圈减薄研究中的几个问题 [J]. 地学前缘, 2003, 10 (3): 51~60.

WU Fu-yuan, GE Wen-chun, SUN De-you, et al. Discussions on the lithospheric thinning in eastern China [J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10 (3): 51~60.

- [14] 周新华. 中国东部中、新生代岩石圈转型与减薄研究若干问题 [J]. 地学前缘, 2006, 13 (2): 50~64.

ZHOU Xin-hua. Major transformation of subcontinental lithosphere beneath eastern China: Review and prospect [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13 (2): 50~64.

- [15] 阮小敏, 滕吉文, 安玉林, 等. 阴山造山带和鄂尔多斯盆地北部磁异常场与结晶基底特征研究 [J]. 地球物理学报, 2011, 54 (9): 2272~2282.

RUAN Xiao-min, TENG Ji-wen, AN Yu-lin, et al. Analysis of magnetic anomaly and crystalline basement of the Yinshan orogen and the northern Ordos basin regions [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2011, 54 (9): 2272~2282.

- [16] 冯锐, 郑书真, 黄桂芳, 等. 华北地区重力场与沉积层构造 [J]. 地球物理学报, 1989, 32 (4): 385~398.

FENG Rui, ZHENG Shu-zhen, HUANG Gui-fang, et al. Gravity field and structure of the sedimentary layer in North China [J]. Acta Geophysica Sinica, 1989, 32 (4): 385~398.

- [17] 王涛, 徐鸣洁, 王良书, 等. 鄂尔多斯及邻近区航磁异常特征及其大地构造意义 [J]. 地球物理学报, 2007, 50 (1): 163~170.

WANG Tao, XU Ming-jie, WANG Liang-shu, et al. Aeromagnetic anomaly analysis of Ordos and adjacent regions and its tectonic implications [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50 (1): 163~170.

- [18] 内蒙古第一物探大队. 内蒙古自治区 1:50 万航空磁力异常图 and 1:100 万布格重力异常图综合研究报告 (1987—1990 年) [R]. 呼和浩特: 内蒙古第一物探大队, 1991.

The First Geophysical Prospecting Brigade in Inner Mongolia. Comprehensive research report of 1:500000 aeromagnetic anomaly map and 1:100000 Bouguer gravity anomaly map in Inner Mongolia Autonomous Region (1987—1990) [R]. Hohhot: The First Geophysical Prospecting Brigade in Inner Mongolia, 1991.

- [19] 何泽新, 张绪教, 贾丽云, 等. 内蒙古狼山山前台地成因及其新构造运动意义 [J]. 现代地质, 2014, 28 (1): 98~108.

HE Ze-xin, ZHANG Xu-jiao, JIA Li-yun, et al. Genesis of piedmont terraces and its Neotectonic movement significance in Langshan Mountain area, Inner Mongolia [J]. Geoscience, 2014, 28 (1): 98~108.

- [20] 张振法. 内蒙古主要山体“山根”问题研讨——山形异常和镜像异常补偿模式 [J]. 物探与化探, 1990, 14 (3): 232~238.

ZHANG Zhen-fa. A study of 'mountain root' problem for the main mountain mass of Inner Mongolia: Compensation models

for mountain-shape anomaly and mirror-image anomaly [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1990, 14 (3): 232 ~ 238.

[21] 钟韬. 超高密度电法在探测采空区中的应用研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2008.

ZHONG Tao. Application research of ultra high density electrical method in the detection of mined out area [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2008.

[22] 国家地震局《鄂尔多斯周缘活动断裂系》课题组. 鄂尔多斯周缘活动断裂系 [M]. 北京: 地震出版社, 1988: 1 ~ 328.

Research Group of the Active Faults around Ordos Department in State Seismological Bureau. Active fault system around Ordos [M]. Beijing: Seismological Press, 1988: 1 ~ 328.

GRAVITY, MAGNETIC AND ELECTRIC COMPREHENSIVE GEOPHYSICAL PROSPECTING FOR DEEP STRUCTURES IN HETAO BASIN

LIU Rong¹, MA Jian-qing¹, LI Qing-chun¹, YE Pei-sheng²

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The gravity, magnetic, and electrical methods have been used to reveal the structure developed in the deep covered area of the Hetao Basin. We have carried out a lot of research on the characteristics of the northern and southern boundary faults, the features and thickness of Quaternary sediments and the structures developed in the basement of the Hetao Basin. A preliminary study on the distribution of Quaternary aquifer in this area was made by using electrical resistivity method. The joint inversion results of gravity and magnetic data, and earthquake data have been analyzed. And four concealed fault F_1 to F_4 from south to north and Langshan-Seertengshan piedmont fault F_5 have been revealed. The fluctuation and buried depth of the crystalline basement in the area have been revealed. Depth of the basement in the southern part of the study area is about 2.5 ~ 4.2 km, and which in the northern part is up to 6 km. North Adjacent to the Seertengshan piedmont fault, the basement rock has been uplifted to about 0—1 km.

Key words: Hetao Basin; magnetic prospecting; gravity exploration; ultrahigh density resistivity method; crystalline basement; buried fault