

doi: 10.11720/wtyht.2022.1314

陈晓晶, 虎新军, 白亚东, 等. 银川盆地南部灵武凹陷基底构造特征[J]. 物探与化探, 2022, 46(4): 862–867. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1314>

Chen X J, Hu X J, Bai Y D, et al. Basement structure characteristics of the Lingwu depression in southern Yinchuan Basin[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2022, 46(4): 862–867. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2022.1314>

银川盆地南部灵武凹陷基底构造特征

陈晓晶, 虎新军, 白亚东, 仵阳, 陈涛涛, 曹园园, 倪萍

(宁夏回族自治区地球物理地球化学勘查院, 宁夏 银川 750001)

摘要: 灵武凹陷位于银川断陷盆地东南部, 受喜马拉雅期两次构造应力作用, 即鄂尔多斯地块 EW 向的拉张应力及青藏高原 NE 向的挤压应力, 造就了该区现今复杂的地质构造格局, 为构造转折、交汇部位。自 1970 年以来监测到银川盆地及其周缘大于 2.0 级以上地震约 3 000 余次, 且大多数小震及中强地震集中于灵武凹陷范围内, 存在较严重的地震灾害隐患。以往研究表明, 断裂构造为地震发生的根本原因, 地层是决定地震活动次生灾害的主要因素。为解译灵武凹陷基底地质构造, 笔者以 1:5 万区域重力资料为基础, 以钻孔、地震剖面、大地电磁测深、可控源音频大地电磁测深剖面资料为约束, 利用 2.5D 人机交互反演技术对灵武凹陷基底特征进行了精细刻画, 为地震灾害防治工作提供依据。

关键词: 灵武凹陷; 1:5 万重力; 2.5D 人机交互反演; 基底构造

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2022)04-0862-06

0 引言

针对灵武凹陷基底构造的研究均是贯穿于银川盆地构造研究中, 苏世民、雷启云等认为盆地南部与北部具有的不对称性正好相反, 北部西深东浅, 南部东深西浅, 南段沉降中心靠近地堑的东缘, 沉降厚度偏向黄河断裂^[1-2]; 李清河^[3]认为银川盆地整体呈 NNE 走向, 但在干沟—横城一线以南转为 NNW 走向, 大致以该界限为界分为南北两部分, 北部为“银北凹陷”, 南部称“灵武凹陷”, 并将灵武凹陷划分为 3 个亚一级构造单元: 永宁隆起带、灵武浅陷带和南翼斜坡带, 将灵武凹陷与北部银北凹陷对比, 区域构造方向变为 NW 走向, 沉降幅度小, 基底为奥陶系; 邓起东等^[4]以银川盆地为研究, 认为盆地地下壳上部发生强烈速度逆转, 低速层厚达 10~15 km, 莫霍面隆起幅度可达 6 km; 侯旭波等^[5]认为银川盆地基底构造层以挤压构造样式为主, 表现为逆冲断层及

相关褶皱, 而南部灵武凹陷剖面上表现为对冲的构造样式, 与逆断层相关的褶皱多数顶部被剥蚀, 仅残留底部; 陈晓晶、李宁生等^[6-8]基于地球物理资料以搭建三维构造模型的方式对银川盆地深部地质构造进行了整合, 认为灵武凹陷新生界上覆于奥陶系褶皱基底之上, 沉积的最大厚处约 3 700 m, 下部基底埋深约 5 600 m。前人的研究成果基本厘清了灵武凹陷地层结构及基底形态, 但以往研究成果以小比例尺的地球物理资料为主, 资料精度有限。笔者在前人的认识基础上, 以钻孔及物探剖面为约束, 以重力 2.5D 人机交互反演成果为基础, 系统地刻画了灵武凹陷构造格架和基底起伏形态。

1 地质构造概况

研究区位于银川断陷盆地南端吴忠、灵武地区, 东界为黄河断裂, 西界为永宁县—梧桐树乡一线以东, 总体呈 NNE 走向的不规则“菱形”展布。南北

收稿日期: 2021-06-11; 修回日期: 2022-03-24

基金项目: 宁夏回族自治区重点研发计划重大(重点)项目(2018BFG02012); 宁夏深部探测方法研究示范创新团队项目(KJT2019005); 宁夏自然科学基金项目(2020AAC03449, 2021AAC03451); 2020 年宁夏回族自治区青年拔尖人才培养工程项目

第一作者: 陈晓晶(1990-), 女, 2014 年毕业于西北大学, 硕士学位, 主要从事地球物理勘探研究工作。Email: 825785150@qq.com

通讯作者: 虎新军(1987-), 男, 2009 年毕业于中国石油大学(北京), 学士学位, 主要从事地球物理勘探研究工作。Email: junyan_home@126.com

长约 37 km, 东西宽约 10 km, 凹陷面积约 350 km²。大地构造位置属柴达木—华北板块 I 级构造单元、华北陆块 II 级构造单元、鄂尔多斯地块 III 级构造单元、鄂尔多斯西缘中元古代—早古生代裂陷带 IV 级构造单元、银川断陷盆地南段 V 级构造单元^[9]。

研究区发育 NW 及近 SN 向断裂, 黄河断裂为最主要的控边断裂^[10-15]。前人研究结果表明, 灵武凹陷存在两套基底, 上部为奥陶系褶皱基底, 下部为古元古界结晶基底, 新生界地层直接覆盖于奥陶系褶皱基底之上, 为第四系覆盖区(图 1)。

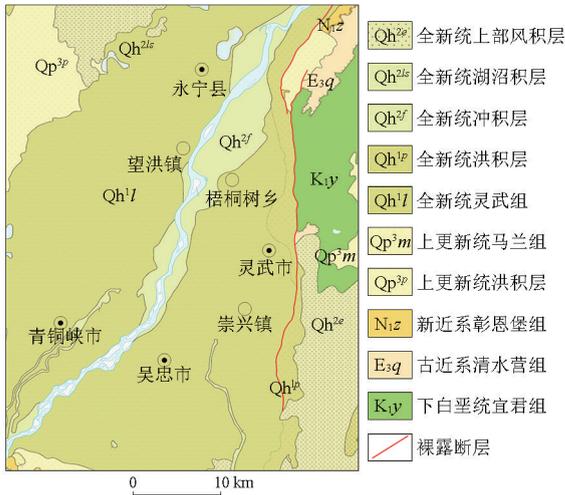


图 1 研究区地质构造

Fig.1 Geological structure of the study area

2 岩石物性特征

2.1 密度特征

根据前人研究成果^[6-8], 研究区及周缘地区出露地层密度由新到老呈增大趋势, 第四系土壤层密度均值变化范围在 1.80~2.16 g/cm³ 之间, 其中洪积层密度均值为 2.0~2.16 g/cm³, 冲积层密度次之, 均值为 1.9 g/cm³, 风积层密度为 1.88~1.91 g/cm³, 湖积层密度最小, 平均值为 1.80 g/cm³; 新近系—古近系砂岩层密度变化为 2.02~2.5 g/cm³; 古生界奥陶系密度值多在 2.63~2.73 g/cm³ 之间变化, 平均密度值为 2.69 g/cm³; 下伏古元古界结晶基底密度范围为 2.7~2.83 g/cm³, 均值为 2.78 g/cm³。

各地层密度特征如表 1。研究区地层间存在 3 个密度界面, 其中古近系—新近系与上覆第四系存在约 0.65 g/cm³ 的密度差, 与下伏奥陶系褶皱基底形成密度差为 0.24 g/cm³ 的密度界面; 奥陶系与下伏古元古界密度差较小, 仅为 0.09 g/cm³, 上述两个明显的密度界面直接影响了研究区及周缘的局部重力异常, 下伏基底间的密度界面对其虽有影响, 但影响力有限。

2.2 电性特征

表 2 为根据前期大地电磁勘探成果总结的银川地堑的地壳上地幔电性分层结构^[16-17]。不同的地

表 1 研究区密度层划分

Table 1 Density layer division table of the study area

地层代号	密度层代号	平均密度值/ (g · cm ⁻³)	密度界面	
			代号	密度差/(g · cm ⁻³)
Q	ρ_1	1.8	$\Delta\rho_{1,2}$	0.65
E-N	ρ_2	2.45	$\Delta\rho_{2,3}$	0.24
O	ρ_3	2.69		
Pt	ρ_4	2.78	$\Delta\rho_{3,4}$	0.09

表 2 银川地堑壳幔电性结构分层

Table 2 The layering of the electrical structure of the crust and mantle in Yinchuan Graben

层序	电阻率/($\Omega \cdot m$)	厚度/km	底面深/km
1	5~50	2~5	2.4~5
2	600~1000	16~19	19~22
3	1~20	20~25	30~32
4	1000~5000	60	85~89
5	0.2~12		

质构造单元, 深部电性结构差别明显, 位于构造活动剧烈的银川断陷盆地电性结构复杂, 电性界面起伏大, 银川地堑区壳幔电性结构大致可分为 5 层, 其下

方存在壳内低阻层和上地幔隆起, 隆起区呈南北狭长形展布, 基本与地堑相吻合, 反映了剧烈的构造作用和深部物质运动的结果。

3 基底构造特征研究

3.1 平面特征分析

以银川盆地南部 1:5 万布格重力数据为基础, 采用小波变换方法对此数据进行多尺度分解, 将分解的各阶次重力场与钻孔分层数据对比, 三阶细节场功率谱分析场源似深度约 3 000 m, 可作为褶皱基底顶面起伏产生的场, 结果如图 2 所示。灵武凹陷

并非为银川断陷盆地中央拗陷区南端单一沉陷区,而是由梧桐树次凹、崇兴西次凸及崇兴次凹共同构成,整体呈不规则走向的菱形片状,面积约 350 km²。西侧的梧桐树次凹表现为 NNE 向片状展布,自梧桐树乡延伸至吴忠北,面积约 100 km²,异常相对平缓,无极小值点,反映了该次级凹陷面积小、深度浅的展布特征,南端梯度较大;东侧崇兴次凹受黄河断裂控制,呈近 SN 向长条展布,面积约 200 km²,3 个极值区分别位于永宁东、灵武北及灵武市,东西两侧形态基本对称;中部崇兴西次凸呈 NNE 向似菱形展布,将灵武凹陷一分为二,是夹持于黄河断裂与吴忠断裂之间的次级凸起,推测为灵武凹陷内残存的古地

形,由古元古界基底隆升较高所致。

依上述结果利用平面帕克法反演研究区奥陶系基底深度,如图 3 所示,反演结果显示的 NHR-1 井的界面深度为 2 950 m,因此,以界面深度反演结果作为奥陶系上界面深度是相对可靠的。结果表明灵武凹陷基底整体表现为“中间高、两侧低”,且紧邻黄河断裂崇兴次凹为凹陷沉降中心。具体地,西侧梧桐树次凹基底埋深约 3 400~3 500 m,中部小范围的崇兴西次凸基底顶面埋深最浅,约 3 100~3 250 m,东侧崇兴次凹基底埋深在 3 500~4 200 m 之间,落差较大,最深区位于中部灵武市北。

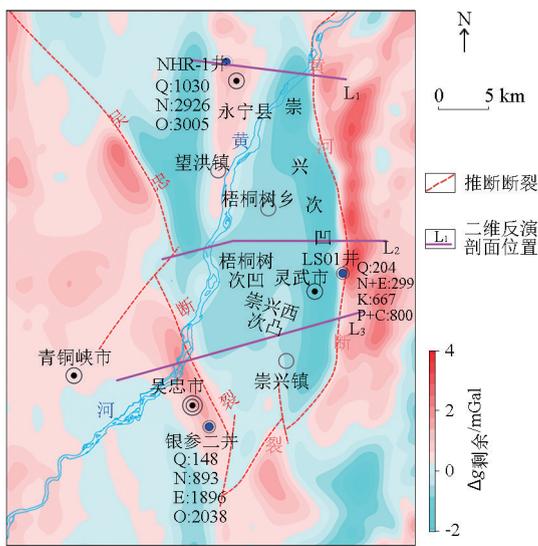


图 2 灵武凹陷剩余重力异常及二维反演剖面位置
Fig.2 Remaining gravity anomaly map and 2.5D inversion profile position of Lingwu depression

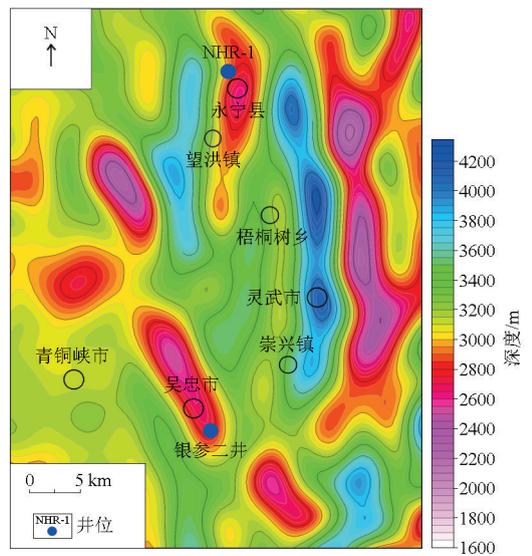


图 3 灵武凹陷基底顶面深度
Fig.3 Depth map of basal top surface in Lingwu depression

3.2 剖面地质结构特征研究

为了从纵向上剖析灵武凹陷由北至南深部地质特征变化,精细地分析灵武凹陷基底起伏形态,笔者以横跨灵武凹陷的 3 条实测 1:1 万重力数据为基础,综合参考与剖面重合的可控源音频大地电磁测深(CSAMT)及周缘 D-L、WZ-1 深地震反射剖面解释结果,以 NHR-1、LS01 及银参二井 3 口钻孔的分层数据为约束,在岩石(地层)密度特征的指导下,利用 Oasis montaj 软件 GMSYS 剖面模拟模块对 3 条骨干剖面进行 2.5D 人机交互反演,结果如图 4~图 6 所示。

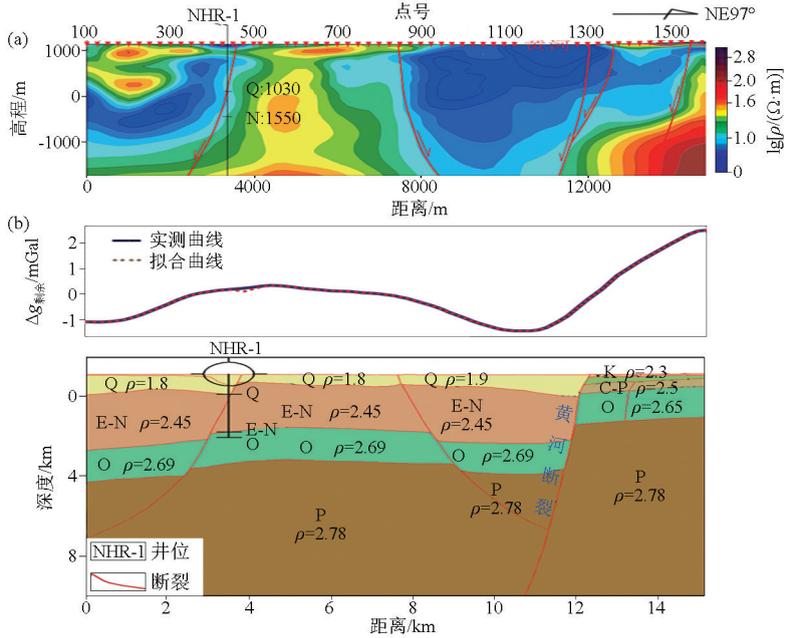
以发射极距不小于 1.8 km、收发距不小于 9 km、接收极距 100 m、发射频率 9600~0.25 Hz 为数据采集参数,应用成都理工大学研发的 MTSOFT2D V2.3 软件,采用空间滤波法进行静态校正,选取带地形非线性共轭梯度二维反演(NLCG)方法得到的 3 条

CSAMT 反演电阻率剖面,如图 4a~图 6a 所示。灵武凹陷北部电阻值以范围宽泛而简单的低阻为主,不具备层状结构,体现出湖泊相沉积地层的电性特征,是深度较大的局部凹陷的体现;中部表现为分布范围宽缓、阻值纵向成层、电性结构单一的低阻异常区。可以看出,局部凹陷内地层以新生界砂泥岩沉积为主,厚度大于 3 000 m,纵向上分为明显的 3 个电阻层,依次为浅部中低阻层(0~200 m)、中部低阻层(200~1 500m)、深部中低阻层(1 500~3 000 m),依据区域地层电阻率值特征分析,这 3 层对应第四系—古近系;南部电法剖面呈现典型的“二元”结构,以 800 m 埋深为界,以浅层段的电性特征表现为局部薄层、不连续中阻层与宽缓、稳定的高阻层的组合特征,反映了浅表第四系砂砾夹粉土沉积层的厚度较小,而新近系的河流相碎屑岩沉积层厚度较大,且横向连续展

布。以深区域低阻区为主要背景,局部呈现斜向刺穿式分布的中阻条带,为古近系湖相砂泥岩沉积的局部凹陷的电性特征,说明中央坳陷区南部新生界沉积厚度比较大,奥陶系基底受断层作用,下错深度较大,为南部一处具有代表性的盆地沉积中心。

由图 4b 拟合结果可知:灵武凹陷北部基底表现为范围较小的“凹槽”型,受黄河断裂控制,沉降中心紧邻黄河断裂,埋深约 3 900 m;图 5b 拟合结果表

明凹陷中部基底形态整体为“西浅东深”的斜坡样式,西侧梧桐树次凹基底为宽缓平台区,宽约 8 km,东侧崇兴次凹范围较小,为基底埋藏最深区;由图 6b 拟合结果看出:凹陷南部与中部展布范围一致,受黄河断裂及吴忠断裂共同控制,基底整体抬升并呈“垒块”式展布,具体地,梧桐树次凹南端基底埋深约为 3 400 m,中部小范围的崇兴西次凸最高处理深约 3 100 m,崇兴次凹南段基底埋深与北端相当。

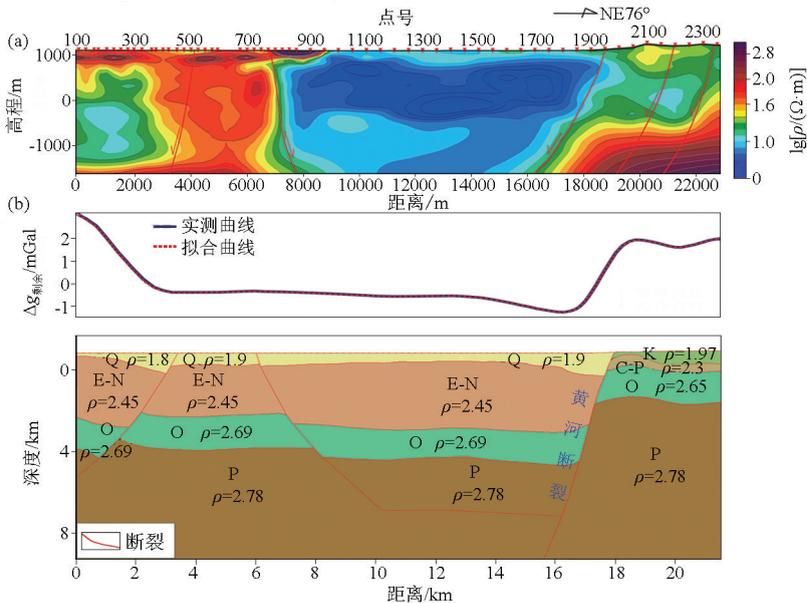


a—CSAMT 反演电阻率剖面;b—2.5D 反演结果

a—inversion resistivity profile of CSAMT;b—2.5D inversion result

图 4 北部 L1 剖面 2.5D 反演过程

Fig.4 2.5D inversion process of the northern L1 profile

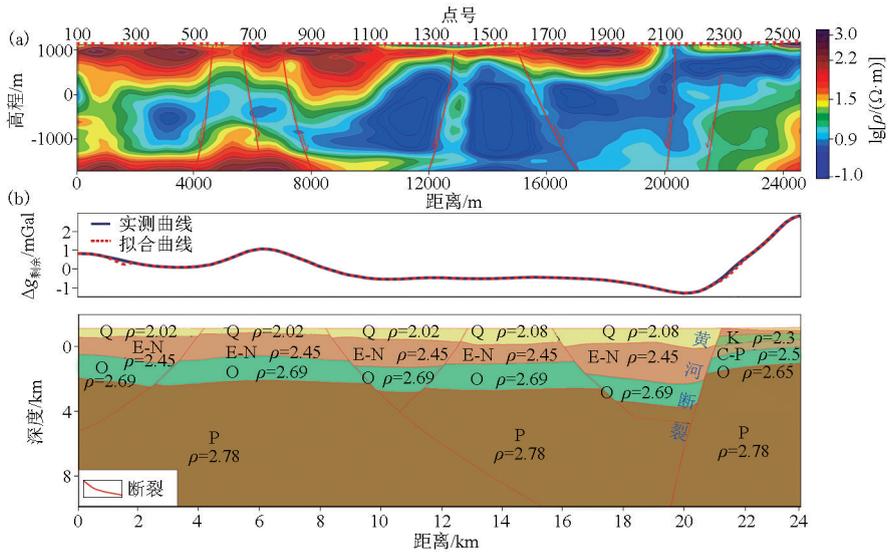


a—CSAMT 反演电阻率剖面;b—2.5D 反演结果

a—inversion resistivity profile of CSAMT;b—2.5D inversion result

图 5 中部 L2 剖面 2.5D 反演过程

Fig.5 2.5D inversion process of the central L2 profile



a—CSAMT 反演电阻率剖面;b—2.5D 反演结果

a—inversion resistivity profile of CSAMT;b—2.5D inversion result

图6 南部L3剖面2.5D反演过程

Fig.6 2.5D inversion process of the southern L3 profile

综上,灵武凹陷上部的奥陶系褶皱基底呈北部窄、中南部范围广的特征展布,厚度为1500m,下部的变质岩基底为整个凹陷的结晶基底。纵向上,西侧梧桐树次凹为宽缓平台区,埋深较浅;东侧受黄河断裂控制崇兴次凹基底呈南北高、中部低的“鞍部”特征,且南北端新生界覆盖层厚度相当;中部的崇兴次凸为凹陷内基底埋藏最浅区。

4 结论

1) 灵武凹陷并非为盆地南部单一沉陷区,而是由梧桐树次凹、崇兴西次凸及崇兴次凹这3个次级构造单元共同构成。平面上凹陷整体呈不规则菱形片状展布,西侧梧桐树次凹相对平缓,深度较浅,约3400~3500m;东侧崇兴次凹受黄河断裂控制为灵武凹陷沉积中心,呈近SN向长条展布,自北至南分布3个极值区,基底埋深约3500~4200m之间;中部崇兴西次凸将灵武凹陷一分为二,是灵武凹陷内残存的古地形,基底埋深约3100~3250m。

2) 纵向上,灵武凹陷上部的奥陶系褶皱基底北部呈小范围“凹槽”型展布,中南部展布范围较广,奥陶系厚度约1500m。西侧梧桐树次凹为宽缓平台区,埋深较浅;中部小面积崇兴西次凸为埋深最高点,东侧崇兴次凹呈南北高、中部低的“鞍部”特征,鞍部中心位于灵武市北,且南北端新生界覆盖层厚度相当。

综上所述,灵武凹陷具有范围广、基底深、覆盖层厚度大的特征,且沉积—沉降中心带状展布于灵

武东山山前,这与前人的观点是一致的。基底埋深最深处约4200m,与前人解释的基底最大埋深差约1000m。本次以地球物理资料为主,在前人认识的基础上对灵武凹陷基底由北至南、由西至东的展布形态及埋深范围等特征进行了细致刻画,并认为此凹陷并非为单一凹陷区,而是具有“一凸两凹”的构造格局,且凹陷中西侧古地形稍有隆起。

参考文献 (References):

- [1] 苏世民.鄂尔多斯盆地西缘的两个不同类型的盆地[J].西安石油学院学报,1996,11(4):21-24.
Su S M. Two different types of basin in the west margin of Ordos basin[J]. Journal of Xi'an Petroleum Institute, 1996, 11(4): 21-24.
- [2] 雷启云.青藏高原东北缘弧形构造带的扩展与华北西缘银川盆地的演化[D].北京:中国地震局地质研究所,2016.
Lei Q Y. The extension of the arc tectonic belt in the northeastern margin of the Tibet Plateau and the evolution of the Yinchuan basin in the western margin of the north China [D]. Beijing: China Academic Journal Electronic Publishing House, 2016.
- [3] 李清河.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. Deep structure in the western and southwestern margins of Ordos [M]. Beijing: Seismological Publishing House, 1999.
- [4] 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 Q D, Cheng S P, Min W, et al. Discussion on Cenozoic tectonics and dynamics Ordos block [J]. Journal of Geomechanics, 1999, 5(3): 13-22.
- [5] 侯旭波,崔红庄,郇玉龙.银川盆地不同构造层构造样式及形成演化分析[J].东北石油大学学报,2012,36(6):28-33.
Hou X B, Cui H Z, Huan Y L. Analysis of structural style and tec-

- tonic evolution in Yinchuan basin [J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2012, 36(6): 28-33.
- [6] 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.
- [7] 李宁生, 冯志民, 朱秦, 等. 宁夏区域重磁资料开发利用研究 [M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- Li N S, Feng Z M, Zhu Q, et al. Development and utilization of gravity and magnetic data in Ningxia area [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2016.
- [8] 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. Research on deep structural characteristics and fault activity in Yinchuan plain [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2020.
- [9] 徐占海, 李捍国, 宋新华, 等. 中国区域地质志·宁夏志 [M]. 北京: 地质出版社, 2017.
- Xu Z H, Li H G, Song X H, et al. Regional geology of China, Ningxia [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017.
- [10] 方盛明, 赵成彬, 柴焯章, 等. 银川断陷盆地地壳结构与构造的地震学证据 [J]. *地球物理学报*, 2009, 52(7): 1768-1775.
- Fang S M, Zhao C B, Chai Z Z, et al. Seismological evidence of crustal structure and tectonics in Yinchuan rift basin [J]. *Journal of Geophysics*, 2009, 52(7): 1768-1775.
- [11] 酆少英, 高锐, 龙长兴, 等. 银川地堑地壳挤压应力场: 深地震反射剖面 [J]. *地球物理学报*, 2011, 54(3): 692-697.
- Feng S Y, Gao R, Long C X, et al. Crustal compression stress field in Yinchuan graben; deep seismic reflection profile [J]. *Journal of Geophysics*, 2011, 54(3): 692-697.
- [12] 侯旭波, 尹克敏, 林中凯, 等. 银川盆地构造反转及其演化与叠合关系分析 [J]. *高校地质学报*, 2014, 20(2): 277-285.
- Hou X B, Yin K M, Lin Z K, et al. Analysis of tectonic inversion and its evolution and superposition relationship in Yinchuan basin [J]. *Geological Journal of Universities*, 2014, 20(2): 277-285.
- [13] 黄兴富, 施炜, 李恒强, 等. 银川盆地新生代构造演化: 来自银川盆地主边界断裂运动学的约束 [J]. *地学前缘*, 2013, 20(4): 199-210.
- Huang X F, Shi W, Li H Q, et al. Cenozoic tectonic evolution of the Yinchuan basin: Constraints from the deformation of its boundary faults [J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(4): 199-210.
- [14] 李燕, 刘保金, 酆少英, 等. 利用地震折射和反射波资料研究银川盆地浅部结构和隐伏断裂 [J]. *地球物理学报*, 2017, 60(8): 3096-3109.
- Li Y, Liu B J, Feng S Y, et al. Exploration of shallow structure and buried faults in the Yinchuan basin using seismic refraction and reflection data [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2017, 60(8): 3096-3109.
- [15] 虎新军, 李宁生, 周永康, 等. 银川平原断裂体系划分与研究 [J]. *矿产与地质*, 2018, 32(6): 1075-1083.
- Hu X J, Li N S, Zhou Y K, et al. Division and study of fracture system in Yinchuan Plain [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2018, 32(6): 1075-1083.
- [16] 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): 782-786.
- 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): 782-786.
- [17] 尹秉喜, 闵刚. 宁夏中上地壳电性结构特征研究 [M]. 银川: 宁夏人民出版社, 2014.
- Yin B X, Min G. Research on the electrical structure characteristics of the middle and upper crust in Ningxia [M]. Yinchuan: Ningxia People's Publishing House, 2014.

Basement structure characteristics of the Lingwu depression in southern Yinchuan Basin

CHEN Xiao-Jing, HU Xin-Jun, BAI Ya-Dong, WU-Yang, CHEN Tao-Tao, CAO Yuan-Yuan, NI-Ping

(*Geophysical and Geochemical Exploration Institute of the Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, China*)

Abstract: The Lingwu depression, located in the southeastern part of the Yinchuan Faulted Basin, has a complex geological tectonic framework and serves as the turning and intersection part of structures due to the two Himalayan tectonic stresses, namely the EW-direction tensile stress of the Ordos block and the NE-direction compressive stress of the Qinghai-Tibet Plateau. Since 1970, more than 3000 earthquakes with magnitudes of greater than 2.0 have been monitored in the Yinchuan Basin and its periphery. Among them, most of the small and moderately strong earthquakes occurred in the Lingwu depression, which, therefore, has serious hidden risks of earthquake disasters. Previous studies indicate that fault structures are the cause for the earthquakes and that strata serve as the main reason for the earthquake secondary disasters in this depression. To interpret the geological structures in the basement of the Lingwu depression, this study finely characterized the basement characteristics of the Lingwu depression using the 2.5D human-computer interactive inversion technology based on the 1:50,000 regional gravity data and the constraints of data on drill holes, seismic profiles, magnetotelluric sounding, and controlled source audio-frequency magnetotellurics (CSAMT) profiles, thus providing a basis for the prevention and control of earthquake disasters.

Key words: Lingwu depression; 1:50,000 gravity; 2.5D human-computer interactive inversion; basement structure

(本文编辑: 叶佩)