

doi: 10.11720/wtyht.2020.1301

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. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1301>

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. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2020.1301>

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

陈晓晶, 虎新军, 李宁生, 安百州, 白亚东

(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: 银川平原地质构造为一新生代断陷盆地, 隶属于鄂尔多斯西缘裂陷带, 被贺兰山隆褶带与陶乐—横山堡冲断带所夹持, 同时受到鄂尔多斯地块西缘 EW 向拉张应力与阿拉善微陆块 NE 向的挤压应力, 造就了该区现今复杂的地质构造特征, 并且作为青藏地块、鄂尔多斯地块和阿拉善地块的分界及南北地震带的重要组成部分, 银川断陷盆地成为中国大陆内活动性比较强的边界构造之一, 历史上曾发生过多次强震。为解释银川断陷盆地深部地质构造, 笔者以 1:20 万区域重力资料为基础, 钻孔、地震剖面、大地电磁测深剖面资料为约束, 对银川平原进行 2.5D 人机交互反演, 并以此成果为依据, 构建了银川平原深部三维地质构造模型, 为区域稳定性评价及地热资源勘探开发奠定坚实的基础。

关键词: 银川平原; 深部地质构造; 2.5D 人机交互反演; 三维地质构造模型; 区域稳定性评价; 地热资源勘探

中图分类号: P631

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2020)02-0245-09



0 引言

针对银川平原深部地质构造的研究, 成果丰硕。前人通过部分石油地震、大地电磁测深等地球物理方法推测盆地内新生界最厚沉积层约 7 000 m^[1-3]; 汤锡元等根据地震勘探成果, 将银川盆地划分为 5 个次级构造单元^[4]; 孟广魁等认为银川盆地除贺兰山东麓断裂与黄河断裂两条边界断裂外, 还存在规模较大的芦花台断裂与银川断裂两条隐伏断裂^[5]; 王美芳等少数学者对银川盆地的构造特征进行了初步分析, 认为银川盆地整体构造概貌为中部断落较深, 向两侧以断阶状或斜坡状抬升, 呈西陡东缓的巨大的宽缓向斜形态^[6-7]; 侯旭波总结了银川盆地新生界及基底地层的不同构造样式, 认为新生界主要发育伸展和伸展—走滑构造样式, 基底发育挤压和

反转构造样式^[8]; 汪琪等通过横跨银川平原的大地电磁测深剖面分析了盆地内 4 条断裂的深部交切关系, 并分析了除主要断裂之外的其他次级小规模断裂的剖面展布特征^[9-10]; 刘金保等对横过地堑 4 条主要断层进行了深地震反射探测, 推进了对银川地堑深、浅构造关系的认识^[11-13]。银川断陷盆地内部四口银参井及 NSR-2、Y4 两口深部地热井钻孔资料揭示, 盆地北部与中南部深部地层结构存在较大差异。可以说, 上述众多科研成果逐步将银川盆地地质构造特征研究引向深入。

但是, 银川盆地深部地层结构特征及断裂关系复杂, 仅从地层界面特征不足以完整反映盆地内局部构造单元展布形态、地层纵向叠置特征、断裂深部交切关系、主次断裂组合模式、基底构造发育细节等深部地质构造的南北变化。笔者在前人认识的基础上, 以钻孔资料为约束, 重力 2.5D 人机交互反演成

收稿日期: 2019-06-03; **修回日期:** 2019-12-03

基金项目: 宁夏回族自治区地球物理地球化学勘查院自筹资金项目(宁夏物勘院[2017]自筹资金 001 号); 宁夏回族自治区重点研发计划重大(重点)项目(2018BFG02012)

作者简介: 陈晓晶(1990-), 女, 宁夏银川市人, 工程师, 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, 宁夏银川市人, 工程师, 主要从事地球物理勘探研究工作。Email: junyan_home@126.com

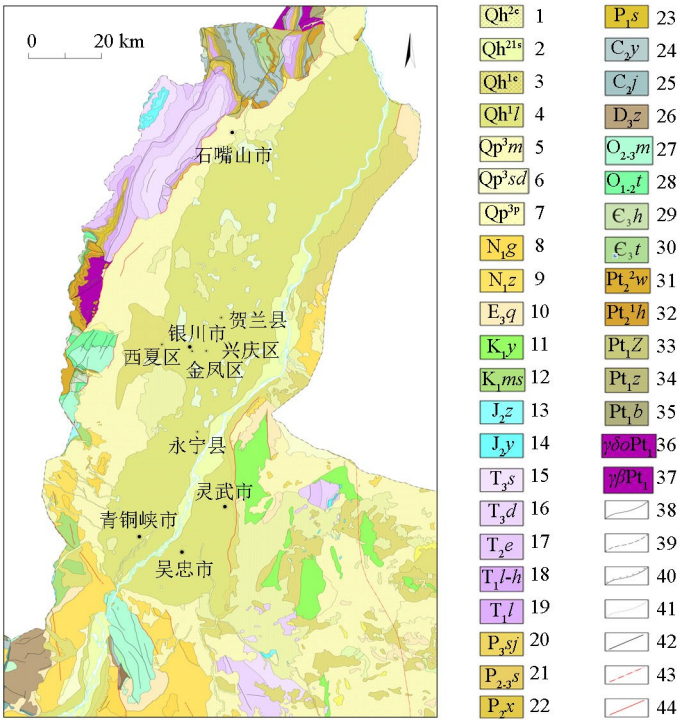
果为基础,搭建了银川平原深部三维地质模型,系统地研究了盆地深部构造格架和基底起伏形态。

1 地质构造概况

银川新生代断陷盆地亦称银川地堑,与贺兰山山体基本平行。东界为黄河断裂,西界为贺兰山东麓断裂。石嘴山至银川、永宁段盆地走向为 NE30°,

临河堡—青铜峡以南和石嘴山以北为 SN 走向,总体呈反“S”形。北东段长达 110 km,南北段长达 130 km,宽度 20~50 km 不等,为南北两端窄中间宽的新生代地堑^[14-15](图 1)。

银川断陷盆地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。盆地内一系列倾向相同



1—全新统上部风积层;2—全新统湖沼积层;3—全新统下部风积层;4—全新统灵武组;5—上更新统马兰组;6—上更新统水洞沟组;7—上更新统洪积层;8—新近系干河沟组;9—新近系彰恩堡组;10—古近系清水营组;11—下白垩统宜君组;12—下白垩统庙山湖组;13—中侏罗统直罗组;14—中侏罗统延安组;15—上三叠统上田组;16—上三叠统大风沟组;17—中三叠统二马营组;18—下三叠统刘家沟与和尚沟并层;19—下三叠统刘家沟组;20—上二叠统孙家沟组;21—中上二叠统上石盒子组;22—中二叠统下石盒子组;23—下二叠统山西组;24—上石炭统羊虎沟组;25—上石炭统靖远组;26—上泥盆统中宁组;27—中上奥陶统米钵山组;28—下中奥陶统天景山组;29—中寒武统胡鲁斯台组;30—中寒武统陶思沟组;31—中元古代王全口组;32—中元古代黄旗口组;33—古元古代赵池沟岩群;34—古元古代宗别立岩组;35—古元古代宾布勒岩组;36—古元古代英云闪长岩;37—古元古代黑云母花岗岩;38—地质界线;39—推测地质界线;40—不整合界线;41—岩相界线;42—重要断层;43—隐伏断层;44—活动断层

1—Upper Aeolian deposits of Holocene; 2—Lacustrine deposits of Holocene; 3—Lower Aeolian deposits of Holocene; 4—Lingwu formation of Holocene; 5—Malan formation of Upper Pleistocene; 6—The tunnel ditch formation of Upper Pleistocene; 7—Diluvium layer of Upper Pleistocene; 8—Ganhegou formation of Neogene; 9—Zhanghenbao formation of Neogene; 10—Qingshuiying formation of Paleogene; 11—Yijun formation of Lower Cretaceous; 12—Miaoshanhu formation of Lower Cretaceous; 13—Zhiluo Formation of Middle Jurassic; 14—Yan'an formation of Middle Jurassic; 15—Shang-tian formation of Upper Triassic; 16—Dafengou formation of Upper Triassic; 17—Ermaying formation Middle Triassic; 18—Liujiagou and shanghegou coalbed of Lower Triassic; 19—Liujiagou formation of Lower Triassic; 20—Liujiagou formation of Lower Triassic; 21—Upper Shihezi formation of Middle Upper Permian; 22—Lower Shihezi formation of Middle Permian; 23—Shanxi formation of Lower Permian; 24—Yanghugou formation of Upper Carboniferous; 25—Jingyuan formation of Upper Carboniferous; 26—Zhongning formation of Upper Devonian; 27—Miboshan formation of Middle Upper Ordovician; 28—Tianjingshan formation of Lower Middle Ordovician; 29—Hulustai formation of Middle Cambrian; 30—Taosigou formation of Middle Cambrian; 31—Wanguankou formation of Middle Proterozoic; 32—Huangqikou formation of Middle Proterozoic; 33—Zhaochigou group of Ancient Proterozoic; 34—Zongbieli Rock group of Paleoproterozoic; 35—Binbulite formation of Paleoproterozoic; 36—Tonalite of Paleoproterozoic; 37—Biotite granite of Paleoproterozoic; 38—Geological boundary; 39—Inferred geological boundary; 40—Unconformity boundary; 41—Lithofacies boundary; 42—Important fault; 43—Concealed fault; 44—Active fault

万方数据

图 1 银川平原地质构造
Fig.1 Geological structure map of Yinchuan Plain

的 NNE 向正断层,使地层逐级由两侧向中心错落,形成阶梯状地层结构^[16]。

2 岩石(地层)密度特征

综合银川平原地层密度特征及前人研究成果^[15],本区古生界—元古界地层密度值多在 2.50~2.78 g/cm³ 之间变化,而中生界地层密度值则多在 1.97~2.67 g/cm³ 之间变化,新生界新近系—古近系

密度值较低,在 2.02~2.48 g/cm³ 之间;第四系不同类型沉积层密度均值处于 1.80~2.16 g/cm³ 区间内,其中洪积层密度均值最大,范围 2.0~2.16 g/cm³,湖积层密度最小,平均密度值为 1.80 g/cm³;由于银川平原各构造单元及地层的埋深不同,导致同一地层、不同地区岩石(地层)密度具有明显的差异性,由西向东密度值逐渐降低,且不同地区密度差异较大(表 1、表 2)。

表 1 银川平原地区地层密度特征统计

地层		构造单元	密度特征/(g·cm ⁻³)	
界	系		区间	均值
新生界	新近系	南部斜坡区	2.11~2.29	2.19
	古近系	陶乐—横山堡冲断带	2.00~2.04	2.02
		南部斜坡区	1.92~2.19	2.08
中生界	白垩系	陶乐—横山堡冲断带	1.95~2.00	1.97
		贺兰山褶断带	2.36~2.64	2.48
	侏罗系	陶乐—横山堡冲断带	1.99~2.14	2.07
		贺兰山褶断带	2.45~2.65	2.56
	三叠系	陶乐—横山堡冲断带	2.39~2.53	2.46
		贺兰山褶断带	2.60~2.77	2.67
古生界	二叠系	贺兰山褶断带	2.60~2.81	2.70
	石炭系	贺兰山褶断带	2.49~2.65	2.57
	奥陶系	贺兰山褶断带	2.63~2.73	2.69
元古宇	贺兰山群	贺兰山褶断带	2.72~2.83	2.78

表 2 银川平原地区第四系覆盖层密度特征统计

地层	岩性	采集地区	密度均值/(g·cm ⁻³)
全新统湖积层(Qh ^{2l})	砂质粘土、粘土质砂及淤泥	永宁	1.80
全新统上部风积层(Qh ^{2e})	中—细砂、粉砂	羊肠湾	1.88
全新统下部风积层(Qh ^{1e})	细砂、粉砂、砂质粘土、粘土质砂及淤泥	陶乐	1.91
全新统冲积层(Qh ^{2f})	粘土质砂、砂质粘土夹卵砾石、砂砾石	北滩	1.90
全新统洪积层(Qh ^{1p})	砾石、砂砾石夹砂土	芦花	2.00
上更新统洪积层(Qp ^{3p})	粘土质砂	闽宁	2.16

3 剖面地质结构特征

为了从纵向上剖析银川盆地在不同地区各套沉积地层的深部地质特征变化,精细地分析盆地内各次级构造单元之间的过渡关系及各局部构造(凹陷/凸起)的剖面特征,从而为银川盆地三维地质模型的搭建提供依据,以银川盆地中部 V-V' 骨干剖面为例,综合参考该剖面周缘的大地电磁测量 G-G' 剖面与深地震反射 YC-1 剖面解释结果,运用银川平原 1:20 万剩余重力异常数据(地形相关补偿后),以银参三井分层数据为约束,对剖面进行 2.5D 人机交互反演。以此剖面反演结果为依据,在岩石

(地层)密度特征的指导下,以通过骨干剖面的钻孔资料为主要约束条件,对银川断陷盆地重点构造区域及构造转折部位的其他剖面进行重力 2.5D 反演(图 2、图 3)。

3.1 银川断陷盆地北部

以石嘴山地区为代表的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。盆地内部银川断裂、芦花台断裂两条分带断裂浅部为隐伏状,深部交于贺兰山东麓断裂;贺兰山东麓断裂上陡下缓,并于深部归并于黄河断裂之上;黄河断裂规模最大,呈高角度状切入基底岩层。新生界覆盖层巨厚(大于 6 000 m),直接覆盖于元古宇贺兰山岩群之上(图 4)。

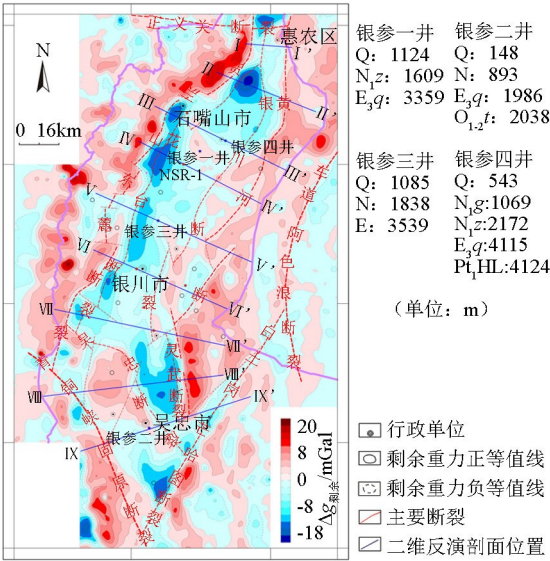


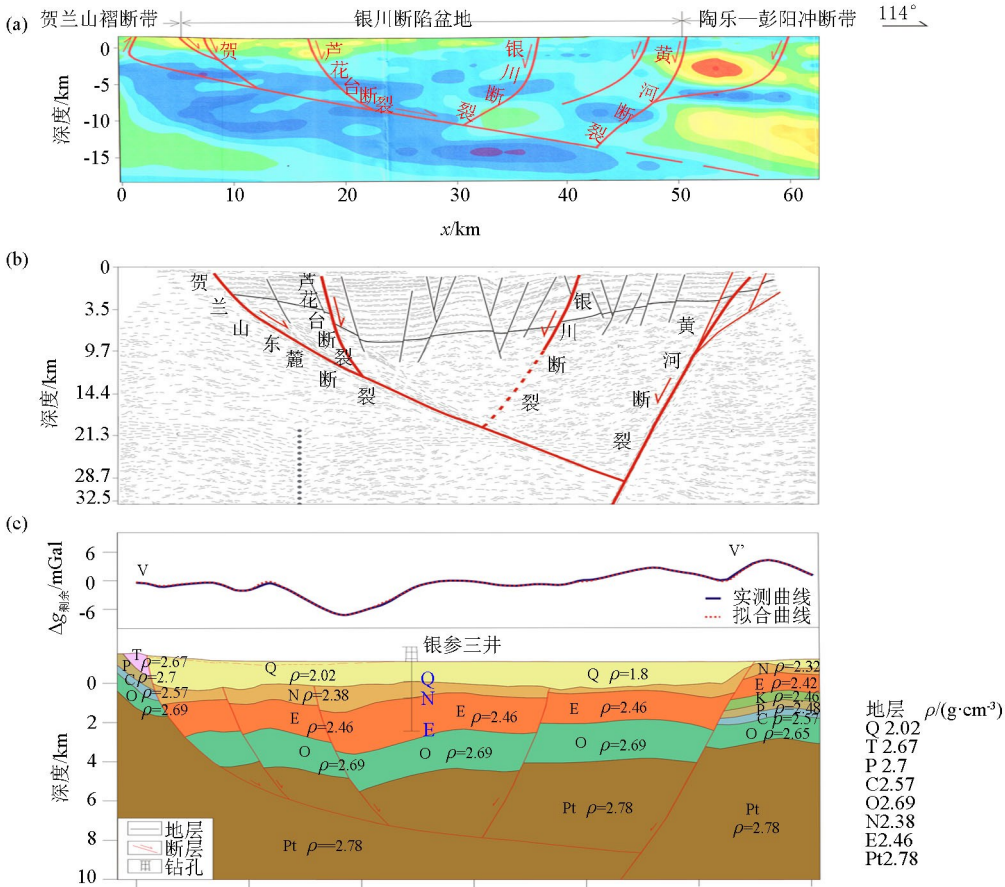
图 2 银川盆地 2.5D 人机交互反演剖面位置
Fig.2 2.5D human-computer interaction inversion
profile location map of Yinchuan Basin

3.2 银川断陷盆地中部

以银川地区为代表的银川断陷盆地中部地层继承了北部“两侧抬升、中部下沉”的基本特征,并具备“层位平缓、基底下沉”的差异性。且沉积—沉降中心整体由靠近贺兰山东麓断裂向靠近芦花台断裂偏移,东部斜坡区的范围较北部石嘴山地区逐渐增大。盆地内银川断裂与芦花台断裂展布形态与北部相同。新生界覆盖层较厚(大于 5 200 m),其覆盖于奥陶系之上,底部为元古宇贺兰山岩群(图 5)。

3.3 银川断陷盆地南部

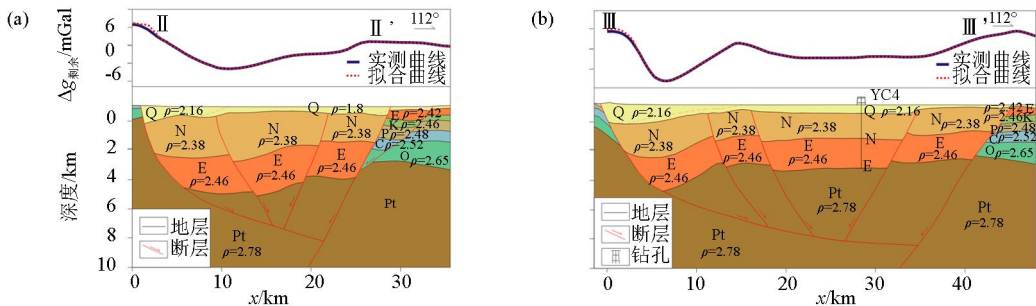
以吴忠、灵武地区为主体的盆地南部与中北部呈显著差异,呈“盆中缩小、斜坡增大,基底抬升、逆冲出现”的变化。盆地内吴忠断裂与灵武断裂两条分带断裂规模较小,深部灵武断裂交于吴忠断裂上,而吴忠断裂归并于黄河断裂之上。盆地中部凹陷区急速缩小,南部斜坡区范围增大,新生界覆盖层变薄(小于 3 000 m),其覆盖于大厚度的奥陶系之上,



a—G-G' 大地电磁测深剖面;b—YC-1 深地震反射剖面;c—V-V' 剖面 2.5D 反演结果; ρ —地层密度;Q—第四系;N—新近系;E—古近系;K—白垩系;T—三叠系;P—二叠系;C—石炭系;O—奥陶系;Pt—元古宇
a—G-G' magnetotelluric sounding profile;b—YC-1 deep seismic reflection profile;c—2.5D inversion process diagram of V-V' profile; ρ —formation density;Q—Quaternary;N—Neogene;E—Paleogene;K—Cretaceous;T—Triassic;P—Permian;C—Carboniferous;O—Ordovician;Pt—Paleoproterozoic

图 3 V-V' 剖面 2.5D 反演过程

Fig.3 2.5 D inversion process diagram of V-V' profile

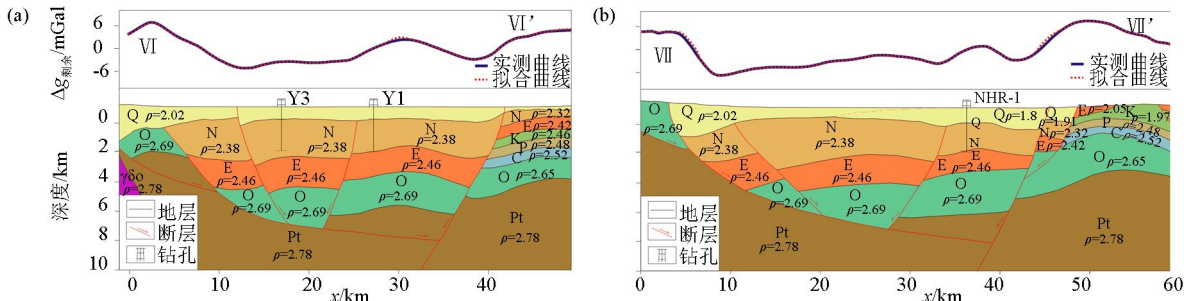


a—II-II'剖面 2.5D 反演结果;b—III-III'剖面 2.5D 反演结果; ρ —地层密度;Q—第四系;N—新近系;E—古近系;K—白垩系;T—三叠系;P—二叠系;C—石炭系;O—奥陶系;Pt—元古宇

a—2.5D inversion process diagram of II-II' profile;b—2.5D inversion process diagram of III-III' profile; ρ —formation density;Q—Quaternary;N—Neogene;E—Paleogene;K—Cretaceous;T—Triassic;P—Permian;C—Carboniferous;O—Ordovician;Pt—Paleoproterozoic

图 4 银川盆地北部剖面 2.5D 反演结果

Fig.4 2.5D inversion results of the northern section in Yinchuan Basin

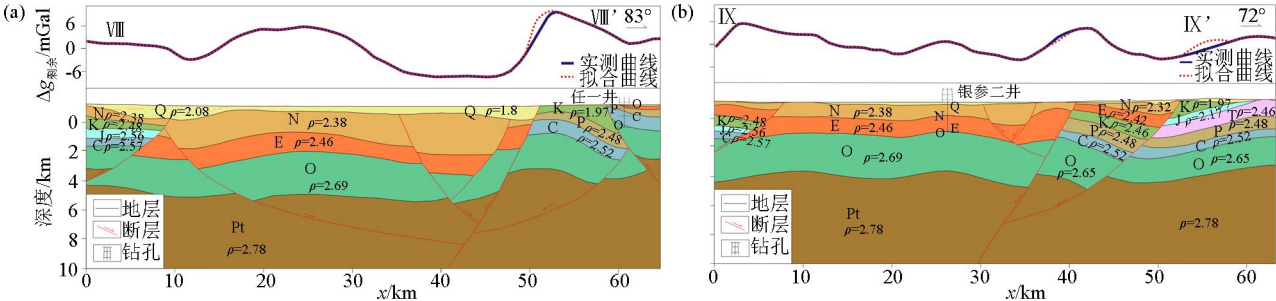


a—VI-VI'剖面 2.5D 反演结果;b—VII-VII'剖面 2.5D 反演结果; ρ —地层密度;Q—第四系;N—新近系;E—古近系;K—白垩系;P—二叠系;C—石炭系;O—奥陶系;Pt—元古宇; $\gamma_{\delta o}$ —英云闪长岩

a—2.5D inversion process diagram of VI-VI' profile;b—2.5 D inversion process diagram of VII-VII' profile; ρ —formation density;Q—Quaternary;N—Neogene;E—Paleogene;K—Cretaceous;P—Permian;C—Carboniferous;O—Ordovician;Pt—Paleoproterozoic; $\gamma_{\delta o}$ —Tonalite

图 5 银川盆地中部剖面 2.5D 反演结果

Fig.5 2.5D inversion results of the central section in Yinchuan Basin



a—VIII-VIII'剖面 2.5D 反演结果;b—IX-IX'剖面 2.5D 反演结果; ρ —地层密度;Q—第四系;N—新近系;E—古近系;K—白垩系;T—三叠系;P—二叠系;C—石炭系;O—奥陶系;Pt—元古宇

a—2.5D inversion process diagram of VIII-VIII' profile;b—2.5 D inversion process diagram of IX-IX' profile; ρ —formation density;Q—Quaternary;N—Neogene;E—Paleogene;K—Cretaceous;T—Triassic;P—Permian;C—Carboniferous;O—Ordovician;Pt—Paleoproterozoic

图 6 银川盆地南部剖面 2.5D 反演结果

Fig.6 2.5D inversion results of the southern section in Yinchuan Basin

古元古界贺兰山岩群抬升,受青铜峡—固原断裂的作用,阿拉善微陆块前缘地层逆冲于盆地南部斜坡区地层之上(图 6)。

4 三维地质构造模型特征

笔者以贺兰山—银川平原的 9 条骨干剖面 2.5D 人

机交互反演结果为基本依据,利用 petrel 软件对其进行了数字化处理,在此基础上重构了贺兰山东麓断裂、芦花台断裂、银川断裂及黄河断裂 4 条主要断裂及新生界覆盖层、奥陶系与元古宇基底地层的三维空间模型,并以平原内 9 口钻孔资料为约束,构建了三维地质构造模型,直观地理清了银川盆地由北到南地质构造的变化情况。

4.1 主要断裂深部特征

银川断陷盆地的边界断裂贺兰山东麓断裂、黄河断裂及白土岗—芒哈图断裂为 NNE 走向正断层,青铜峡—固原断裂为 NW 走向的逆冲断层,盆地南部青铜峡—固原断裂与白土岗—芒哈图断裂对银川断陷盆地的直接控制作用不明显,反映在三维地质构造模型中,断裂与盆地其余几条断裂相互关系不够密切。

贺兰山断裂作为盆地西部控制断裂,自古近系以浅表现为陡立状,古近系以深至元古宇基底老地层断裂产状逐渐变缓;黄河断裂作为盆地的东部边界断裂,其南段浅部为裸露状,中北段为隐伏状;芦花台断裂产状较陡立;银川断裂断面较平直(图 7)。

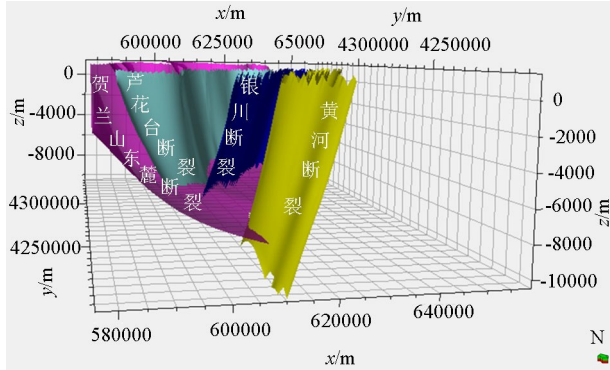


图 7 银川断陷盆地内部分带断裂立体图
Fig.7 Three-dimensional map of faults in the Yinchuan fault Basin

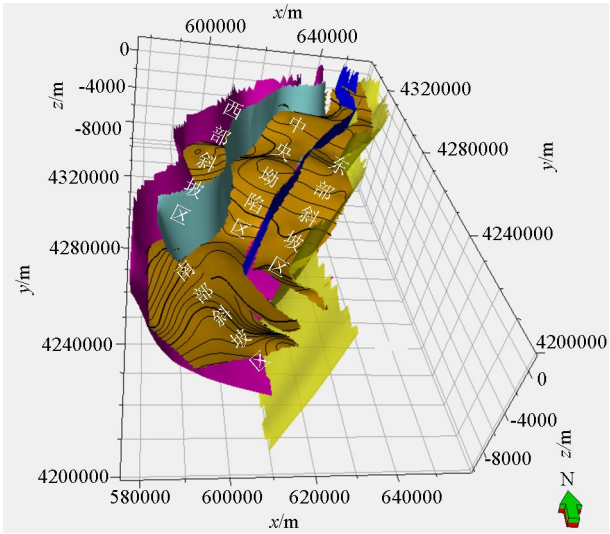
4.2 局部构造单元特征

前人将银川断陷盆地细分为北部斜坡区、西部斜坡区、中央拗陷区、东部斜坡区与南部斜坡区五个次级构造单元^[4],笔者认为由于银川断陷盆地内北部无区域性断裂作为北部与中部构造单元分界线,因此,北部斜坡区并不明显存在,进而将银川断陷盆地划分为 4 个次级构造单元(图 8)。

4.2.1 西部斜坡区

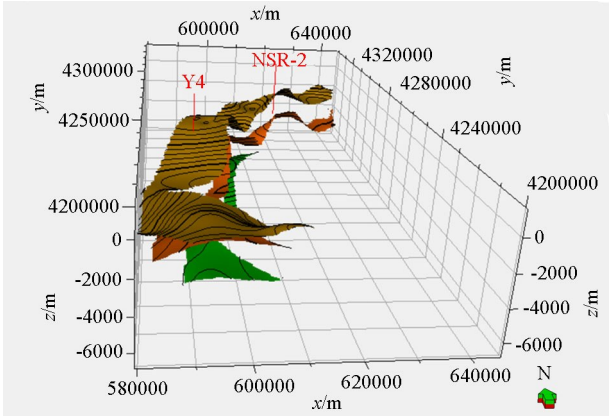
夹持于贺兰山东麓断裂与芦花台断裂之间,呈长条状展布。横向上,地层西高东低,为贺兰山隆褶带与银川盆地的过渡区域;纵向上,北部地区新生界地层直接覆盖于古元古界贺兰山岩群之上,中南部地区新生界地层覆盖于奥陶系地层之上,底部为古元古界结晶基底(图 9)。

斜坡带内的两处低陷区域为中央拗陷区平罗凹陷与银川凹陷的西侧部分,北部隆升区域为平罗南凸起北端。中部为苏峪口东侧贺兰山山前隆起,较北部平罗南凸起幅度低,是由古元古界结晶基底及奥陶系褶皱基底上隆所致,且隆起幅度最大地层为奥陶系。**万方数据**



地层为新近系
The stratum is the bottom of Neogene

图 8 银川断陷盆地次级构造单元划分图
Fig.8 Sub-structural unit division map of Yinchuan fault Basin



黄色为新近系底,橘黄色为古近系底,绿色为奥陶系底
Yellow is the bottom of Neogene, orange is the bottom of Paleogene, and green is the bottom of Ordovician

图 9 银川断陷盆地西部斜坡区立体图
Fig.9 Three-dimensional map of the western slope area of Yinchuan fault Basin

4.2.2 中央拗陷区

位于西部斜坡区与东部斜坡区之间,受芦花台断裂与银川断裂控制,纵向上沉积地层与西部斜坡区一致,北部新生界地层直接覆盖于古元古界贺兰山岩群之上,中部与南部新生界地层覆盖于奥陶系地层之上,底部为古元古界贺兰山岩群,且具有“三凹两凸”的构造格局(图 10)。

1) 主要局部凹陷。北部凹陷为平罗凹陷,新生界地层直接覆盖于贺兰山岩群之上,沉积最大厚度处位于古近系地层,约 6 000 m,是盆地内新生界沉积厚度最大区。中部洪广次凹与兴泾次凹构成银川凹陷,主要分布地层为新生界、奥陶系与古元古界地

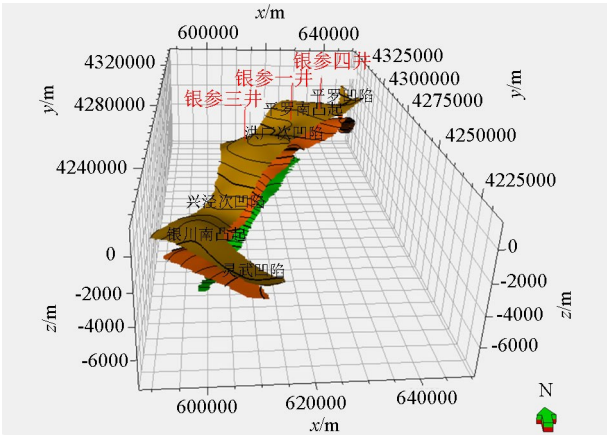


图 10 银川断陷盆地中央坳陷区立体图

Fig.10 Three-dimensional map of the central depression area of Yinchuan fault Basin

层,凹陷沉积的最大厚度处约为 5 200 m,较北端平罗凹陷沉积厚度稍浅,北部洪广次凹形成于古近系地层,后期新近系与第四系地层继承性的沉积于其上,与之不同的是南部兴泾次凹形成于奥陶系地层时期,后期新生界地层继承性的沉积于奥陶系地层之上。南部灵武凹陷新生界地层上覆于奥陶系褶皱基底之上,深度最小,沉积的最大厚度处约为 3 700 m,形成于奥陶系地层,后期新近系与第四系地层呈继承性沉积于古近系地层上。

2)主要局部凸起。北部为平罗南局部凸起,主要由古元古界变质岩基底上隆所致,上覆沉积新生界地层。南部为银川南凸起,由古元古界结晶基底与奥陶系褶皱基底共同上隆所致,且隆起主要体现在奥陶系地层中,上隆幅度较北部平罗南局部凸起幅度低。

4.2.3 东部斜坡区

东部斜坡区是盆地东部受银川断裂与黄河断裂控制,银川盆地陶乐—横山堡冲断带过渡的宽缓的平台区,地层横向上表现为向东抬升的特征,纵向上北部地区新生界地层直接覆盖于古元古界基底之上,中南部新生界地层覆盖于奥陶系地层之上,底部为古元古界贺兰山岩群(图 11)。

斜坡带内北部低陷区为平罗凹陷东侧向台地过渡的过渡带,南部为金贵凹陷,沉积最大厚度处约为 3 200 m,为古近系地层,凹陷形成于奥陶系地层,后期新生界地层继承性的沉积于奥陶系地层之上。

北部隆升区域为东部斜坡向台地过渡的构造特征,中部为掌政凸起,南部为永宁凸起,是由古元古界变质岩基底上隆所引起,上覆沉积新生界地层。

4.2.4 南部斜坡区

斜坡区发育于吴忠断裂与青铜峡—固原断裂,

为盆地南端受阿拉善微陆块向北东扩张而形成的隆升区,纵向上,新生界地层覆盖于奥陶系地层之上,下伏古元古界基底。斜坡区北部分布青铜峡凸起,是受基底及奥陶系上隆所致(图 12)。

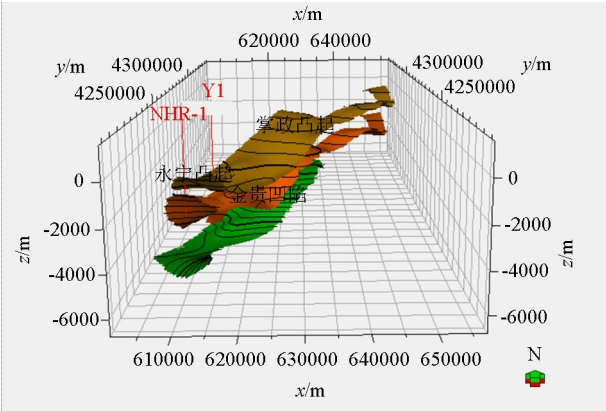


图 11 银川断陷盆地东部斜坡区立体图

Fig.11 Stereogram of the eastern slope area of Yinchuan fault Basin

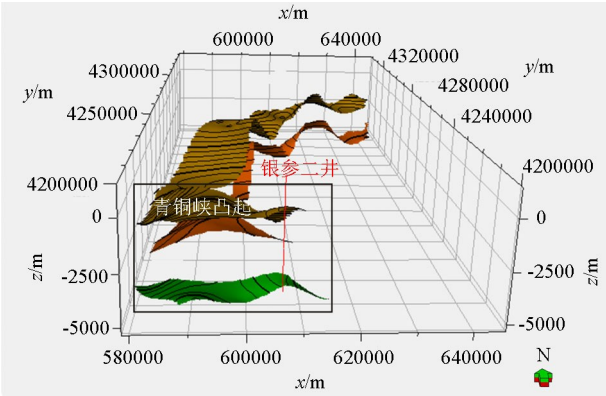


图 12 银川断陷盆地南部斜坡区立体图

Fig.12 Stereogram of the southern slope area of Yinchuan fault Basin

4.3 盆地基底特征

银川断陷盆地深部纵向上存在两套基底,上部的奥陶系褶皱基底展布以平罗南凸起为界,南北差异性较大,北部奥陶系缺失,南部展布范围广,且厚度由北向南逐渐增大;下部的古元古界变质岩基底为整个盆地的结晶基底,其顶界面的起伏形态影响着上覆地层的沉积形态,直接决定了盆地内部局部凸起与局部凹陷的形成。

平罗凹陷、银川凹陷、灵武凹陷及金贵凹陷中,下降幅度最大区为平罗凹陷,新生界厚度约 6 000 m。中部的银川凹陷下部基底埋深约为 7 800 m 处。南部灵武凹陷下部基底埋深约 5 600 m。贺兰山山前隆起、平罗南凸起、银川南凸起、青铜峡凸起、掌政凸起及永宁凸起中除北部平罗南凸起由古元古界结晶基底上隆所致,其余几处隆起与凸起区均由古元

古界结晶基底及奥陶系褶皱基底上隆所致,且奥陶系顶界面的隆升幅度最大。

贺兰山东麓断裂与黄河断裂深部均切入基底岩层,黄河断裂规模最大,贺兰山断裂归并于黄河断裂上。盆地内部分带断裂芦花台断裂与银川断裂深部亦切入基底岩层。

5 结论

1) 银川盆地内 4 条主要断裂深部展布特征清楚:① 贺兰山东麓断裂浅部为裸露状,于深部归并于黄河断裂;② 黄河断裂浅部南段呈裸露状、中北段为隐伏状,深部呈高角度状切入基底岩层;③ 芦花台断裂与银川断裂产状较陡立,浅部呈隐伏状,深部归并于贺兰山东麓断裂上;④ 4 条断裂及其次级附属断裂空间上形成“花状”特征的银川地堑系。

2) 银川盆地由 4 个局部构造单元构成:① 西部斜坡区夹持于贺兰山东麓断裂与芦花台断裂之间,呈长条状展布,为贺兰山隆褶带与银川盆地的过渡区域;② 中央拗陷区为盆内沉积厚度最大区域,具有“三凹两凸”的构造格局;③ 东部斜坡区受银川断裂与黄河断裂控制,为银川盆地向陶乐—横山堡冲断带的过渡区,具有宽缓展布的平台特征;④ 南部斜坡区被吴忠断裂与青铜峡—固原断裂所夹持,为盆地南端受阿拉善微陆块向北东方向扩张而形成的隆升区。

3) 银川断陷盆地存在两套基底,上部的奥陶系褶皱基底展布以平罗南凸起为界,北部奥陶系缺失,南部展布范围广,且厚度由北向南逐渐增大;下部的古元古界变质岩基底顶界面起伏较大,影响着上覆地层的沉积形态。

综上所述,通过对银川平原三维地质模型的构建,将前人对银川平原深部地质构造碎片化的认识进行了集成与定量深化,将各断裂深部展布及与各地层之间的关系进行了整合,对银川盆地由北至南、由深至浅的地质构造进行了系统的梳理及更直观的展示,为后期对银川盆地的研究提供了更加系统的认识。

参考文献 (References):

- [1] 国家地震局“鄂尔多斯活动断裂系”课题组.鄂尔多斯周缘活动断裂系[M].北京:地震出版社,1988.
The Research Group of Active Fault System around Ordos Massif, SSB. Active fault system around Ordos massif[M]. Beijing: Seismological Press, 1988.
- [2] 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.

- [3] 王鑫,詹艳,赵国泽,等.鄂尔多斯盆地西缘构造带北段深部电性结构[J].地球物理学报,2010,53(3):595-604.

Wang X, Zhan Y, Zhao G Z, et al. Deep electric structure beneath the northern section of western margin of the Ordos basin [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2010, 53(3):595-604.

- [4] 汤锡元,郭忠铭,陈荷立,等.陕甘宁盆地西缘逆冲推覆构造及油气勘探[M].西安:西北大学出版社,1992.

Tang X Y, Guo Z M, Chen H L, et al. Thrust nappe structure and oil and gas exploration in the western margin of the Shaanxi-Gansu-Ningxia Basin [M]. Xi'an: Northwest University Publishing House, 1992.

- [5] 孟广魁,王增光,廖玉华,等.银川平原地震区划研究[M].银川:宁夏人民出版社,1994.

Meng G K, Wang Z G, Liao Y H, et al. Yinchuan plain earthquake regionalization research [M]. Yinchuan: Ningxia People's Publishing House, 1994.

- [6] 宁夏回族自治区地质矿产局.宁夏回族自治区区域地质志[M].北京:地质出版社,1989.

Geological Mining Bureau of Ningxia Hui Nation Municipality. Geological annals of Ningxia Hui nation municipality [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989.

- [7] 王美芳,李慧勤.宁夏银川盆地地质构造演化特征[J].科技资讯,2008,6(3):154-155.

Wang M F, Li H Q. Geological tectonic evolution characteristics of Yinchuan basin, Ningxia [J]. Science & Technology Information, 2008, 6(3): 154-155.

- [8] 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 tectonic evolution in Yinchuan basin [J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2012, 36(6): 28-33.

- [9] 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 magneto telluric Sounding (MT) method to deep geothermal investigation in Plain [J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2016, 13(6): 782-786.

- [10] 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.

- [11] 刘保金,鄯少英,姬计法,等.贺兰山和银川盆地的岩石圈结构和断裂特征——深地震反射剖面结果[J].中国科学:地球科学,2017,47(2):179-190.

Liu B J, Feng S Y, Ji J F, et al. Lithospheric structure and faulting characteristics of the Helan Mountains and Yinchuan basin: Results of deep seismic reflection profiling [J]. Science China: Earth Sciences, 2017, 47(2):179-190.

[12] 李燕,刘保金,鄯少英,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 J B, 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.

[13] 刘城,杨宇山,刘天佑,等.根据重力资料定性及定量解释银川平原断裂体系[J].物探与化探,2019,43(1):28-35.
Liu C, Yang Y S, Liu T Y, et al. Qualitative and quantitative interpretation of fracture system in Yinchuan plain based on gravity data[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2019, 43 (1):28-35.

[14] 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.

[15] 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.

[16] 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.

Research on the deep geological structure in Yinchuan Plain:
3D modeling based on geophysical data

CHEN Xiao-Jing, HU Xin-Jun, LI Ning-Sheng, AN Bai-Zhou, BAI Ya-Dong
(Geophysical and Geochemical Exploration Institute of the Ningxia Hui Autonomous Region, Yinchuan 750001, China)

Abstract: The geological structure of Yinchuan Plain is a Cenozoic fault basin, which belongs to the western marginal zone of Ordos block, and is sandwiched between the Helanshan uplift belt and the Taole-Hengshanbao thrust belt. It is also subjected to the east-west tensile stress of the Ordos block and the northeastward compression stress of the Alxa micro-continent, which forms complex geological structural features of this area. As an important part of the Tibetan block, the Ordos block and the Alxa block, and the important component of the north-south seismic belt, the Yinchuan fault basin has become one of the more active boundary structures in China's mainland, and had many strong earthquakes in history. In order to interpret the deep geological structure of the Yinchuan fault basin, the authors employed 1:200,000 regional gravity data, drilling data, seismic section, and magnetotelluric profile data as constraints to perform 2.5D human-computer interaction inversion in Yinchuan Plain. Based on this result, a deep 3D geological model of the Yinchuan Plain was constructed, which laid a solid foundation for regional stability evaluation, exploration and development of geothermal resources.

Key words: Yinchuan Plain; deep geological structure; 2.5D human-computer interaction inversion; 3D geological model; regional stability evaluation; geothermal resource exploration

(本文编辑:王萌)